В. А. ИЛЬИН

ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ И ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автоматика и телемеханика»

МОСКВА ЭНЕРГОИЗДАТ 1982

ББК 32.968
И 46
УДК 621.398(075.8)

Рецензент: Кафедра автоматики и процессов управления ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)

Ильин В. А.

И46 Телеуправление и телеизмерение: Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1982. — 560 с., ил.

В пер.: 1 р. 30 к.

Даны теоретические основы, принципы построения и проектирования, а также примеры систем и комплексов устройств телемеханики. Рассмотрены применения теории сигналов, информации, кодирования, помехоустойчивости. По сравнению со вторым изданием (1974 г.) значительно расширены материалы по оптимизации структур, методам и средствам отображения информации, цифровым устройствам и типовым телемеханическим комплексам.

Для студентов вузов, изучающих курс «Телемеханика» и «Информационно-измерительные системы».

И $\frac{2404000000-497}{051(01)-82}$ 199-82

ББК 32.968
6Ф6.8

© Энергоиздат, 1982

ПРЕДИСЛОВИЕ

За период от второго до третьего издания книги (с 1974 г.) произошли существенные изменения в телемеханике.

Телемеханические устройства, выпускаемые заводами, многофункциональные, более массовые, имеют интегральную микроэлектронную элементную базу и рассчитаны на работу с ЭВМ, а ряд из них функционирует со встроенными микропроцессорами, микро-ЭВМ. Возникли новые образования, такие, как сети телемеханики.

С массовым внедрением микроэлектронной элементной базы резко сократился удельный вес схемотехнических задач, связанных с созданием и эксплуатацией отдельных элементов и функциональных узлов телемеханики, которые выпускаются промышленностью и имеют более высокую надежность. Одновременно возросло число системотехнических задач по оптимизации сложных телеуправляемых комплексов, требующих знания специальных теоретических дисциплин.

В телемеханике начинают преобладать системотехнические задачи вместо схемотехнических.

В связи с широким и многообразным применением телемеханики чрезвычайно расширился круг специалистов, соприкасающихся в своей непосредственной деятельности с методами и техническими средствами телеизмерения, телесигнализации, телеконтроля и телеуправления. Эта обширная категория инженеров, научных работников и учащихся нуждается в компактном и систематизированном изложении современных идей, методов и принципов построения систем телемеханики. В предлагаемой книге сделана попытка восполнить этот пробел и изложить основы современной телемеханики.

Книга написана как учебное пособие по курсу «Телемеханика» и соответствует программе этого курса для специальности «Автоматика и телемеханика».

По сравнению с предыдущим изданием расширены главы книги, в которых излагаются вопросы, посвященные помехоустойчивым кодам, цифровым методам и устройствам

телемеханики. Введены новые главы и параграфы, посвященные современным каналам связи, системам телеконтроля, применению микро-ЭВМ и наборов микропроцессоров в телемеханике, проектированию систем телемеханики на основе интегральных микросхем, сетям с ЭВМ и быстроразвивающимся новым сетям телемеханики, интерфейсу. Обновлены главы, посвященные узлам и устройствам телемеханики, передаче данных, информационным потокам и приоритетам. Даны расчетные примеры и вопросы для самопроверки, облегчающие изучение теоретических глав книги. Книга состоит из трех частей.

В первой части излагаются методы передачи команд телеуправления, сигналов телесигнализации и телеизмерений, приводятся основные сведения из теорий информации, кодирования, помехоустойчивости и каналов телемеханики, рассматривается оптимизация структуры сетей.

Во второй части излагаются основы теории и построения систем телемеханики, рассматриваются устройства телеизмерения, телеуправления, телесигнализации, передачи данных и их характеристики. Большое внимание уделяется интенсивно развивающимся цифровым многофункциональным (комплексным) системам.

По сравнению со вторым изданием книги уделяется большее внимание системотехническим вопросам.

В третьей части, посвященной проектированию и применению систем телемеханики, анализируются функции контроля и управления, которые целесообразно поручить человеку или машине, даны рекомендации по проектированию систем телемеханики, в основном на интегральных микросхемах. Седьмая глава, посвященная применяемым в телемеханике логическим элементам и их теории, написана канд. техн. наук, доц. А. Н. Юрасовым.

Автор выражает благодарность заведующим и преподавателям кафедр «Автоматика и телемеханика», приславшим свои отзывы, а также Р. И. Юргенсону и К. Г. Митюшкину за ценные замечания, способствовавшие улучшению содержания книги.

В связи с новизной многих глав книги автор будет благодарен читателям, приславшим свои замечания в адрес издательства: 113114, Москва М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоиздат.

Автор

К характерной особенности современной техники относится широкое внедрение методов и средств автоматики и телемеханики, вызванное переходом на автоматизированное управление. Непрерывно усложняются функции, выполняемые системами автоматизированного управления, а относительная значимость этих систем в процессе производства непрерывно возрастает.

Развитие автоматизации в народном хозяйстве и во всех областях человеческой деятельности идет по пути постепенного увеличения комплексов машин и агрегатов, охватываемых одной или взаимосвязанными системами автоматизированного управления, и совершенствованием процессов управления отдельными машинами и агрегатами. Вначале обычно автоматизируется один агрегат или машина, затем группа машин и далее все более крупный комплекс. Примером может служить переход от автоматизации станка к созданию автоматической линии, цеха-автомата, завода-автомата, группы автоматизированных заводов. Протяженность коммуникаций возрастает.

В основе любой технической, биологической и социальной системы управления и функционирования лежат информационные процессы, связанные с первичным отбором, сбором, предварительной обработкой информации, ее передачей, хранением, обработкой, распределением, отображением, регистрацией, считыванием и исполнением команд управления.

В более простых локальных системах, занимающих сравнительно небольшую территорию, часто отсутствует четкое разделение информационных процессов между отдельными частями системы.

С укрупнением взаимосвязанного комплекса, увеличением сложности системы, занимаемого ею пространства, расстояний между различными частями системы и ее информационной емкости, функции, выполняемые отдельными устройствами, все более дифференцируются. Появляются специализированные устройства сбора, передачи, исполнения команд управления. Комплекс этих устройств с переда-

чей информации на расстояние представляет собой *систему телемеханики*. С укрупнением систем управления и все большей автоматизацией процессов переработки информации системы телемеханики перерастают в крупные автоматизированные информационные системы, разработка которых для управления промышленными комплексами идет в двух направлениях.

Первое направление связано с постепенным усложнением систем телемеханики за счет как усложнения структур и увеличения потоков информации, так и увеличения удельного веса процессов обработки информации, второе — с внедрением вычислительной техники в управление производством и разработкой для целей оперативного управления комплекса устройств, называемых внешними устройствами вычислительных машин. Система внешних устройств ЭВМ, расположенных на расстоянии, представляет собой в основном систему телемеханики многопроводную или двухпроводную в зависимости от способов передачи информации (включая устройства передачи данных).

В связи с широким развертыванием работ по созданию крупных автоматизированных информационных систем, работающих с цифровыми вычислительными машинами, получивших название автоматизированные системы управления (АСУ), значение систем телемеханики и потребность в них существенно возрастают. В тех случаях, когда объекты территориально разобщены и требуется автоматическая telepередача информации, системы телемеханики выполняют функции систем автоматического сбора и передачи для АСУ информации с нижних ступеней контроля и управления.

В.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Термин *телемеханика* происходит от двух греческих слов: tele — расстояние, mechanica — механика. Он был введен в 1905 г. французским ученым Бранли. Первоначально этот термин использовался для области науки и техники управления на расстоянии механизмами и машинами. Телемеханика — область науки и техники контроля и управления на расстоянии путем передачи по каналам связи команд управления и сообщений о состоянии объектов. Она включает в себя вспомогательные устройства для предварительной обработки сбора и хранения информации или

для автоматической передачи по каналам связи команд управления и сообщений о состоянии объектов.

Применительно к летательным аппаратам авиации и ракетной технике телемеханика получила название *телеметрии* (радиометрии) и *радиоуправления*.

На рис. В.1 иллюстрируется обобщенная постановка задачи в телемеханике, где показаны объекты контроля и

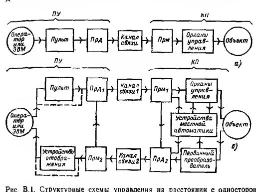


Рис. В.1. Структурные схемы управления на расстоянии с односторонней (*а*) и двусторонней (*б*) передачей сообщений.

управления, находящиеся на расстоянии от оператора или ЭВМ, при этом задачи контроля и управления решаются с помощью системы телемеханики. Система телемеханики выполняет функции автоматической связи на расстоянии оператора или ЭВМ с объектами контроля и управления.

Телемеханика применяется в первую очередь в тех отраслях, где нужно объединить территориально разобщенные объекты в единый производственный комплекс с централизованным контролем и управлением. Такие задачи возникают в энергосистемах, на нефтепромыслах, трубопроводах, крупных заводах, шахтах, транспорте, в ирригации и т. д. Области применения телемеханики продолжают расширяться.

С внедрением телемеханики повышается производительность труда, снижается себестоимость продукции, повышаются оперативность и надежность управления, резко снижаются аварии и перебои в работе.

К простейшим по структуре системам телемеханики относится система управления на расстоянии контролируемым пунктом (КП), на котором объекты сосредоточены в одном месте.

На рис. В.1, *а* приведена схема простейшей системы телеуправления с передачей информации в одном направлении, например при управлении строительным краном. Необходимость системы вызвана эффективностью управления краном из точки, расположенной вблизи поднимаемого или опускаемого груза. Из кабины крановщика часто не видно груза в момент его подъема или спуска (может заслонять, например, стена здания), что замедляет и усложняет работу крановщика. При управлении краном с помощью системы телемеханики оператор использует небольшой переносной прибор с пультом управления и радиопередатчиком системы. Сигналы команд передаются через ультракоротковолновый радиопередатчик. Для передачи команды оператор нажимает одну из кнопок. Кабину крановщика на телеуправляемых кранах не устанавливают, что позволяет упростить и удешевить оборудование крана.

В простейшем случае для каждого двигателя передаются только три команды, например движение вперед, назад и стоп. Органами управления служат электромагнитные реле, задающие для данного двигателя направление движения и скорость. Приемное устройство системы телемеханики состоит из радиоприемника, принимающего сигналы команд, и декодера команд, выделяющего и формирующего команды включения или выключения конкретного исполнительного реле.

Система телемеханики в рассмотренном примере передает только команды телеуправления (ТУ). Информацию о состоянии объекта оператор получает путем визуального наблюдения. Визуальный контроль за работой на расстоянии для многих объектов невозможен. При этом возникает необходимость в передаче информации также от объектов к оператору по обратному каналу.

Для контроля состояния объектов управления передается информация телесигнализации и телеизмерения. При телесигнализации обычно передается информация типа «да», «нет» об одном из двух состояний или значений величины,

характеризующей состояния объектов (включено или выключено, открыто или закрыто, меньше нормы или в пределах нормы и т. п.).

Сигналы телеизмерения более подробно характеризуют состояние или изменение состояния объекта и дают количественную оценку состояния, отвечая на вопрос о значении измеряемого параметра. Параметры телеизмерения и телесигнализации получают с помощью первичных преобразователей (датчиков).

Для управления на расстоянии все объекты и органы управления должны быть механизированы, а более эффективно можно ими управлять, если они и автоматизированы. Автоматизация осуществляется средствами местной автоматики: на объектах устанавливаются автоматические регуляторы, поддерживающие заданную температуру, уровень жидкости, угол поворота руля, устройства защиты и т. д. С пункта управления при этом передаются лишь так называемые уставки, задающие режим работы автоматическим регуляторам. Система управления, в которой есть средства местной автоматики, более совершенна и более устойчива в работе. Над объектами управления уже не требуется постоянное наблюдение. Даже при повреждении линии связи автоматический регулятор продолжает поддерживать ранее заданный ему режим работы. Функции управления, выполняемые оператором, упрощаются: при необходимости он должен только изменять положение уставок автоматических регуляторов. Поэтому сейчас управление на расстоянии без средств местной автоматики сохранилось главным образом в простейших системах управления, например в рассмотренной системе управления кранами. Функции местной автоматики описаны далее.

На рис. В.1, *б* приведена структурная схема системы управления на расстоянии с передачей информации телеизмерения и телесигнализации в обратном направлении. Такие системы используются для контроля и управления на расстоянии объектами, сосредоточенными в одном месте.

Понятие телемеханика объединяет в любой комбинации более частные понятия, такие, как телеуправление, телесигнализация, телеизмерение, телерегулирование.

Если команды с помощью специальных устройств передаются из пункта управления (ПУ) или с диспетчерского пункта (ДП) к объектам, находящимся на расстоянии, принято говорить о *телеуправлении* (ТУ), если сообщения о состоянии объектов передаются в обратном направле-

ний — *о телесигнализации, телеконтроле и телеизмерении* (ТС, ТК и ТИ). Соответственно устройства, выполняющие функции ТУ, ТС, ТК и ТИ, называются устройствами ТУ, ТС, ТК, ТИ. Более подробно эти устройства рассматриваются в соответствующих главах.

Система телемеханики является одной из разновидностей информационных систем (см. гл. 8) и состоит из устройств телемеханики и каналов связи. Она предназначена для управления или контроля на расстоянии производственным и другими объектами, осуществляет автоматическую связь между оператором или управляющим устройством (ЭВМ) и объектами управления и объединяет их в единый комплекс, в который включаются и средства местной автоматики (рис. В.1). Системы телемеханики во многих случаях включают в себя автоматические устройства, облегчающие работу оператора или повышающие надежность и эффективность передачи сообщений по каналу связи, например устройства автоматического циклического опроса объектов, телепередачи команд по программе, сравнения с уставками, диагностики повреждений или контроля нормального функционирования и т. д.

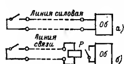


Рис В 2. Схемы местного (*а*) и дистанционного (*б*) управления.

Частным случаем системы телемеханики является система *телеконтроля,* передающая информацию автоконтроля (см. гл. 16) с объектов управления. Функции управления на расстоянии в телеавтоматической системе выполняются частично или полностью управляющими устройствами.

Рассмотрим простейшие схемы местного и дистанционного управления, а также схемы телеконтроля и телеуправления (рис. В.2).

В устройствах *с местным управлением* (рис. В 2, *а*) органы управления и объекты управления соединяются проводниками, по которым протекает ток, необходимый для работы объекта (электродвигателя или другого силового агрегата). Естественно, при этом требуется прокладка силовой линии между органом управления (выключатель) и объектом управления, что целесообразно для сравнительно небольших расстояний.

Для устройств с *дистанционным управлением* характерно наличие отдельной линии связи между каждым органом управления и каждым объектом управления вместо силовой линии при местном управлении. С этой целью, например, для включения и выключения электродвигателя на объекте при дистанционном управлении вблизи объекта *Об* устанавливается реле *Р*, силовые контакты которого замыкают цепь объекта, а цепь управления реле соединяется с органом управления отдельной слаботочной линией связи (рис. В.2, *б*). Сигналы от первичных преобразователей и объектов управления подводятся к ПУ отдельными проводными линиями.

Система телемеханики отличается от системы дистанционного контроля и управления тем, что она имеет одну или несколько линий или каналов связи. Однако их число меньше числа объектов управления или контроля (многопроводные системы телемеханики). Сигналы телеуправления, телесигнализации, а во многих случаях и сигналы телеизмерения передаются по одной линии или одному каналу связи (рис. В.2).

Следовательно, в системах телемеханики применяется уплотнение канала связи и осуществляется передача последовательными кодами (см. гл. 3). Кроме того, применяются меры по уменьшению влияния помех и изменению затухания в канале связи на нормальную работу системы. При дистанционном управлении сигналы передаются параллельными кодами (см. гл. 3).

В рассмотренных примерах оператор и объекты управления были расположены в двух разделенных расстоянием пунктах и соединены в единую систему управления с помощью аппаратуры телемеханики и канала связи. Это наиболее простая по структуре схема телеуправления (пункт — пункт), относящаяся к классу систем телемеханики для сосредоточенных объектов. Расстояние между пунктами управления и контролируемым пунктом в таких системах может быть самым различным. Так, телеуправление Волжскими гидроэлектростанциями производится из Москвы, т. е. на расстоянии около 1000 км, а управление космическими кораблями осуществляется на еще больших расстояниях. В системе радиоуправления строительным краном расстояние составляет десятки метров.

С развитием централизованного автоматического управления производственными процессами в промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве в середине 50-х го-

дов возникла необходимость автоматизации и телемеханизации массовых рассредоточенных объектов. Системой *телемеханики* для рассредоточенных объектов называется система, в которой к общему каналу связи подключается по меньшей мере несколько индивидуально избираемых КП. В таких системах контролируемые пункты рассредоточены или вдоль линии, например на нефте- и газопроводах, в ирригационных системах, на транспорте, или на определенной площади. Все КП участвуют в едином взаимосвязанном производственном процессе.

Характерным примером системы управления некрупными рассредоточенными контролируемыми пунктами является система телемеханики для нефтепромысла. В такой системе для каждого КП (рис. В.3) передается одно-два телеизмерения по вызову (значение давления и рабочих параметров станка-качалки) и несколько сигналов о работе оборудования (аварийная и другая телесигнализация). Обеспечивается двусторонняя телефонная связь, необходимая во время прихода на скважину обходчика или ремонтной бригады. Передаются команды «включить» и «выключить» на расстоянии станок-качалку или другое оборудование.

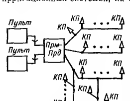


Рис. В.3. Схема каналов связи и аппаратуры на пункте управления для рассредоточенных нефтескважин

На ранних этапах развития централизованного управления были попытки соединить каждую нефтескважину с диспетчерским пунктом несколькими отдельными проводными линиями по числу передаваемых сигналов. В такой системе дистанционного управления промысел «опутывался» множеством проводов дополнительно к линиям электропитания. Системы дистанционного управления стоили дорого, были ненадежны и поэтому не получили распространения. Лучшие решения здесь дает система телемеханики для рассредоточенных объектов, у которой к общему каналу связи присоединяется ряд контролируемых пунктов — нефтескважин (рис. В.3).

Были рассмотрены системы телемеханики с простейши-

ми объектами контроля и управления и с простейшими структурами управления и каналов связи. Реальные современные системы телемеханикн намного сложнее по всем показателям. В одной системе могут передаваться суммарно тысячи сигналов ТУ, ТС, телерегулирования (ТР), телеблокировки (ТБ), телеизмерения текущих значений (ТИТ),

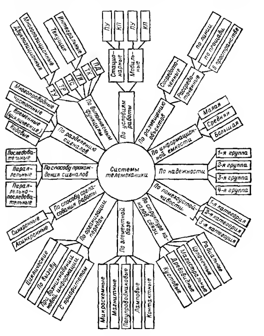


Рис. В 4. Классификация систем телемеханики.

телеизмерения интегральных значений (ТИИ) и буквенно-цифровая производственно-статистическая информация (передача данных — ПД).

Структура каналов связи и управления может быть очень сложной, иерархической, с сотнями КП и несколькими ПУ. Требования к помехоустойчивости и достоверности передачи сигналов могут быть очень высокими, так как ложные команды управления и искажения других сигналов приводят к авариям с тяжелыми последствиями. В этой книге излагаются основы теории и принципы построения систем телемеханики. На рис. В.4 приведена классификация систем телемеханики по различным показателям.

В.2. КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ТЕЛЕМЕХАНИКИ В СССР

Начало интенсивного развития телемеханики относится к 20-м годам этого столетия, а телемеханика как самостоятельная область науки и техники сформировалась еще позже.

Для процесса развития телемеханики характерны следующие этапы

Период первоначальных поисков и лабораторных опытов (до 1930—1936 гг.). В январе 1930 г. в СССР был запущен первый в мире радиозонд с телеизмерительным оборудованием, созданный П. А. Молчановым. Эта работа положила начало развитию радиотелеметрических систем и широкому применению радиозондов в метеорологии.

В 1932—1933 гг. во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) были созданы первые выпрямительные системы телеизмерения тока и напряжения, а несколько позже — токоуравновешенная фотокомпенсационная система. В этот же период в Отраслевой лаборатории измерений (ОЛИз) были разработаны и затем выпущены небольшой партией бесконтактная частотно-импульсная (фотоимпульсная) система телеизмерений, системы интенсивности с трансформаторным первичным преобразователем и электронные выпрямительные системы. Ряд частотно-импульсных и других устройств телеизмерений был создан в Мосэнерго.

В Ленинградском научно-исследовательском институте телемеханики (НИИТ) велись работы по созданию телеизмерительных систем интенсивности и первых короткопериодных время-импульсных систем.

Работы в области телеуправления — телесигнализации были развернуты в начале 30-х годов. В 1933 г. первое разработанное в Мосэнерго устройство телесигнализации с трехпроводной линией связи было введено в эксплуатацию на диспетчерском пункте Мосэнерго. Немного позднее начали действовать первые устройства телеуправления типа РТУ-7, разработанные в Ленэнерго.

В этот же период были созданы одни из первых устройств телеуправления в Донбассэнерго и Электропроме для автоматизированных тяговых подстанций московского трамвая и метрополитена. В начале 40-х годов в Москве было введено централизованное телеуправление освещением улиц.

На первом этапе развития телемеханики было предложено значительное число методов телеизмерения, телеуправления и телесигнализации, получивших дальнейшее развитие и используемых в настоящее время.

Период опытно-промышленных испытаний и внедрения единичных экземпляров телемеханических устройств (1937—1947 гг.). Практическое применение устройств телемеханики началось в энергосистемах Мосэнерго, Ленэнерго и Донбассэнерго с 1935—1936 гг. В 1938 г. был введен комплекс устройств ТУ—ТС и ТИ на диспетчерском пункте энергоснабжения канала им. Москвы, разработанный в Центральных лабораториях Мосэнерго (ЦЛЭМ) и частично НИИТ (г. Ленинград). После этого в ЦЛЭМ развернулись работы по внедрению средств телемеханики в Мосэнерго и телемеханизации системы энергоснабжения Московского метрополитена.

В этот же период были сделаны первые шаги по внедрению методов и средств телемеханики на железнодорожном транспорте. Из-за недостаточной надежности применяемых в то время устройств и еще слабого развития теории телемеханики эти работы имели опытный характер, однако они подготовили условия для широкого внедрения телемеханики в народное хозяйство. Для второго этапа развития телемеханики характерно начало развертывания работ в области теории телемеханики.

Период перехода от отдельных опытных образцов и небольших партий к широкому использованию средств телемеханики в ряде отраслей народного хозяйства (1948—1958 гг.). Для этого этапа характерны дальнейшая интенсивная разработка методов и средств телемеханики, организация серийного заводского производства средств телемеханики и резкое расширение сферы их применения. В этот период значительно расширяются теоретические исследования по всем основным проблемам телемеханики.

В тресте ОРГРЭС с 1946 г., а в ЦНИЭЛ Министерства электростанций с 1948 г. начала разрабатываться электронная телеизмерительная аппаратура частотного типа. В 1948 г. начался серийный выпуск время-распределительной системы телеуправления типа ВРТ-47 на контактных элементах (разработки ЦНИЭЛ). Серийное заводское производство устройств телемеханики впервые было начато в 1950 г. на заводе «Электропульт».

Примерно с 1950 г. начали развертываться работы по созданию

средств телемеханики для нефтедобычи на ряде нефтепромыслов (Средазнефть, Грознефть, Куйбышевнефть и др.), а в дальнейшем — в научно-исследовательских институтах (ВНИИнефть, ВНИИКАнефтегаз, Азнимаш, Институт автоматики и телемеханики — ИАТ).

В ИАТ были предложены и с участием других организаций разработаны частотные устройства телеуправления — телесигнализации для рассредоточенных объектов, получившие в дальнейшем широкое применение в нефтедобыче и на трубопроводном транспорте. Было организовано серийное производство частотных систем телемеханики на заводе КИП в Москве, на заводе им. Калинина в Баку, на заводе «Телемеханика» в г. Нальчике и на других заводах для нефтепромыслов, ирригации и трубопроводов. Упомянутые работы стали основой массовой телемеханизации в этих отраслях.

На железнодорожном транспорте получили широкое применение устройства диспетчерской централизации, разработанные ЦНИИ МПС и выпускаемые заводами МПС.

К концу первого послевоенного десятилетия появилась тенденция к техническому перевооружению средств телемеханики из-за недостаточной надежности, а в ряде случаев и быстродействия устройств с релейно-контактными элементами и электронными лампами. Устройства с электрическими контактами и движущимися кинематическими узлами начали вытесняться высоконадежными магнитными, полупроводниковыми и другими бесконтактными элементами, на основе которых строились системы телемеханики с временным, частотным и комбинированным разделением сигналов. Первые публикации по бесконтактным системам телемеханики промышленного назначения были сделаны в Советском Союзе в 1954 г., а широкое внедрение систем началось с 1958—1959 гг. — на несколько лет раньше, чем за рубежом. Аналогичные работы за рубежом начали публиковаться примерно с 1959 г.

Первое бесконтактное устройство ТС на магнитных элементах было разработано в ИАТ. В дальнейшем эти работы получили развитие также во ВНИИ энергетики (ВНИИЭ), ЦНИИ комплексной автоматизации (ЦНИИКА) и в других организациях.

Новая частотно-импульсная телеизмерительная система без электромагнитных реле и электронных ламп была разработана в ЦНИИКА, а простая время-импульсная система телеизмерения с экспоненциальными преобразователями типа ВСТ — в ИАТ. Система телеизмерений ВСТ в модификациях выпускается почти 20 лет и является самой массовой системой ТИ.

Первая электронная одноканальная кодоимпульсная система телеизмерений была разработана в 1955—1956 гг. в ЦНИИЭЛ. Начиная с 1957 г. работы по созданию кодоимпульсных систем развернулись в ЦНИИКА, где была создана многоканальная кодовая система телеизмерения.

Период перехода к унифицированным, типовым системам телемеханики (с 1956—1958 гг.). В конце 50-х годов требования к системам продолжали резко возрастать и на создание крупных систем специализированного применения каждый раз затрачивалось все больше усилий и времени, исчисляемого порою годами. Системы часто устаревали еще до их пуска в эксплуатацию. Кроме того, возникли новые требования: нужно было обеспечить передачу производственно-статистической информации (учета продукции, затрат материалов, энергии и т. п.), работу систем совместно с ЭВМ, повысить достоверность передачи всей информации.

Пришлось искать более гибкие способы построения систем, осуществлять унификацию и типизацию, строить системы из *типовых* модулей, блоков и субблоков, существенно изменять подход и построению систем телемеханики, сокращать количество методов передачи информации, шире применять адресные и комбинированные системы, *широко использовать* полупроводниковую и микроэлектронную технику.

Научно-исследовательские и проектирующие организации начали *разработку*, а заводы — *выпуск типовых унифицированных систем* телемеханики более широкого применения на основе типовой элементной базы: серии блоков и субблоков типа «Спектр», АССТ и др. С целью *повышения надежности и уменьшения габаритов аппаратуры* все шире начинают применяться элементы микроэлектронной техники — типовые серии интегральных микросхем и модулей.

Развитие элементной базы сопровождается все более глубокой унификацией сначала элементов, затем функциональных блоков и, далее, устройств телемеханики. При каждом таком последующем этапе *развития расширяются функциональные возможности и повышается надежность систем телемеханики.*

Так, если унификация элементов телемеханики на транзисторной элементной базе позволила создать унифицированные элементы серии «Спектр», то применение интегральных микросхем позволило создать уже более сложные унифицированные функциональные блоки серии АССТ (агрегатная система средств телемеханики — см. гл. 18).

В дальнейшем применение микропроцессоров позволило создать унифицированные устройства телемеханики, обладающие еще большими функциональными возможностями и более высокой надежностью.

Производство технических средств телемеханики в результате проведенных мероприятий имеет серийный и массовый характер на специализированных заводах отрасли телемеханики, а объем производства возрастает в 2,5—4 раза в каждую пятилетку.

В телемеханике в настоящее время применяют унифицированные устройства и широко развертываются работы во многих направлениях. По вопросам теории и техническим средствам телемеханики издано бо-

лее 120 книг и опубликованы тысячи журнальных статей. Аппаратуру телемеханики выпускает ряд специализированных заводов.

Телемеханика широко внедряется на железнодорожном транспорте, в энергетике, на нефтепромыслах, на воздушном, автомобильном и трубопроводном транспорте, в технике связи и на промышленных предприятиях.

Большое количество телемеханической аппаратуры требуется в связи с использованием цифровых вычислительных машин и созданием АСУ. Одновременно с развитием промышленной телемеханики идет процесс развития теории и практики построения телемеханических систем для военных и специальных областей, таких, как ракетная техника, космические корабли и спутники, атомная техника, авиация и т. п.

Как говорилось ранее, устройства телемеханики, используемые в этих областях, носят название устройств радиоуправления и радиотелеметрии. Развитие теории и техники телеметрии и радиоуправления оказывало и оказывает существенное влияние на развитие промышленной телемеханики. Некоторые различия обусловлены большими расстояниями и специфическими помехами в специальных радиосистемах. В последнее время наблюдается все большее сближение этих областей, в особенности при создании комплексных систем адресного типа.

В заключение необходимо отметить большой творческий вклад советских ученых и специалистов в создание оригинальных и высокоэффективных устройств и систем промышленной телемеханики, а также в развитие теории телемеханики. Применение методов телемеханики позволяет резко повысить требуемую достоверность передачи сигналов телемеханики, эффективность использования каналов связи и научно обоснованно выбрать способы передачи сигналов *ТИ*, *ТУ*, *ТС*, *ТК* и данных [ПД].

Далее приводится далеко не полное перечисление наиболее существенных работ и их авторов в области промышленной телемеханики:

разработка первых систем телеизмерения в начале 30-х годов (В. О. Арутюнов, А. В. Фремке, К. Б. Карандеев, М. Л. Цукерман и др.);

разработка первых систем телеуправления и телесигнализации в начале 30-х годов (М. А. Гаврилов, Б. К. Щукин, В. А. Смидович, Р. Л. Райнес и др.);

работы, положившие начало развитию кодоимпульсных систем (Г. М. Жданова, О. А. Горяинов);

создание ламповых и транзисторных систем телеизмерения (А. М. Пшеничников, В. С. Малов, В. А. Ильин, Я. А. Купершмидт);

создание бесконтактных элементов и систем телеуправления — телесигнализации для сосредоточенных объектов (В. Н. Тутевич, В. Н. Жожикашвили, К. Г. Митюшкин, И. В. Праигишвили и др.);

разработка систем телемеханики для рассредоточенных объектов

с частотным и временным разделением сигналов (В. А. Ильин, Ф. А. Катков и др.);

разработка систем телемеханики и широкое их внедрение в энергосистемах (Р. Л. Райнес, К. Г. Митюшкин, А. М. Пшеничников и др.);

разработка систем телемеханики и широкое их внедрение на железнодорожном транспорте (Н. Д. Сухопрудский, В. Я. Овласюк, Н. И. Пенкин и др.);

разработка систем телемеханики и широкое их внедрение в нефтедобыче и на трубопроводном транспорте (В. А. Ильин, О. П. Шишкин, А. Г. Мамиконов, В. С. Семенов и др.);

разработка комплексов систем телемеханики общепромышленного применения для различных отраслей народного хозяйства на элементной базе «Спектр» (А. А. Левин, А. М. Пшеничников, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Дмитриев, Г. Д. Антонов);

разработка агрегатного комплекса средств телемеханической техники третьего поколения (АСТТ) на интегральных микросхемах и внедрение его в производство в годы девятой пятилетки (коллектив авторов под руководством А. М. Пшеничникова);

первые работы по теории телеуправления и телеизмерения (Б. К. Щукин, А. В. Фремке, Г. М. Ждаков и др.);

развитие теории телемеханики (коллектив авторов под руководством и при участии В. А. Ильина);

развитие и применение теории кодирования и помехоустойчивости в телемеханике (Г. А. Шастова, Р. И. Юргенсон, Р. Р. Васильев и др.);

развитие теории адаптивных систем в телемеханике (К. Г. Митюшкин).

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СООБЩЕНИЯ И СИГНАЛЫ

1.1. ОСОБЕННОСТИ СООБЩЕНИЙ ТУ, ТС, ТИ

Первичный отбор информации первичными преобразователями, передача, хранение, переработка и другие информационные процессы лежат в основе всех информационных систем, в том числе систем контроля и управления, используемых в технике и биологии.

Информация — это содержательные сведения (данные), заключенные в том или другом сообщении, заранее не известные человеку или машине, принимающим сообщение. *Сообщением* может быть телеграмма, какой-либо текст, значение контролируемого параметра, команда управления и т. п.

Сообщение может иметь *форму*, не приспособленную для передачи, хранения и других информационных процессов в автоматизированных системах. В связи с этим применяются различные способы преобразования, сообщения, такие, как *дискретизация, кодирование, модуляция* с целью получения оптимального сигнала.

Сигналом называется средство передачи (переносчик) сообщения.

В общем виде *сигнал* — это *изоморфное* (*однозначное*) отображение сообщения, всегда существующее в некотором физическом воплощении. Сигнал может нести информацию о событии, т. е. однозначно находиться в соответствии с ним. При определенных условиях сигнал может быть преобразован и восстановлен без потери информации.

В информационных системах наиболее широко используются электрические сигналы с переносчиком в виде синусоидального или импульсного тока и напряжения.

Передача и хранение сообщений в системах телемеханики имеют много общего с системами связи (телеграф, телефон, телевидение и т. д.). Простейшие такие системы

имеют одинаковую структуру (рис. 1.1). Они состоят из последовательно включенных источника сообщений, передающего устройства (состоящего из преобразователей и кодирующего устройства), канала связи, приемного устройства (включающего в себя обратные преобразователи и декодирующее устройство) и получателя сообщений. Сначала рассмотрим особенности телемеханической информации в системах промышленного назначения.

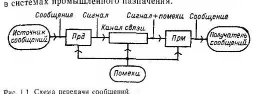


Рис. 1.1 Схема передачи сообщений

Специфика сообщений. В системах контроля, измерения и управления передаются информация о состоянии контролируемых объектов, автоматически получаемая от первичных преобразователей и воспроизводимая или регистрируемая без непосредственного участия человека, а также команды для объектов управления, передаваемые оператором или ЭВМ и автоматически принимаемые объектом (рис. 1.1). В отличие от систем связи в системах телемеханики есть как минимум один автоматический первичный источник или автоматический получатель (приемник) информации.

К особенностям систем телемеханики относится сравнительно малое количество информации, передаваемое от одного источника или для одного приемника информации в единицу времени из-за медленно протекающих производственных процессов. С ПУ для одного объекта передаются сравнительно редко команды типа «включить» или «выключить». Однако общее число объектов управления (получателей сообщений) в системе может быть велико. В системах телеконтроля на пункт контроля и управления передаются также элементарные сигналы о состоянии объектов типа «да», «нет» от многих объектов. Количество информации, передаваемой одному объекту или от одного источника информации, мало и составляет в среднем десятые или сотые доли простейших сигналов типа «да», «нет» в мину-

ту или час. Такой малый объем информации определяется большими постоянными времени промышленных объектов, обычно превышающими десятки секунд.

Характерной особенностью сообщений при телеизмерении является наличие низкочастотных составляющих в спектре первичного сигнала. Спектр этого сигнала, начинающийся от нуля, имеет диапазон от 0 до 1—10 Гц. Напомним, что спектр речи лежит в диапазоне 30—10 000 Гц. На рис. 1.2 показан примерный вид спектра источника сообщений при измерении (ТИ) сигнализации (ТС) телефонной речи (ТФ). Для измерения характерны также более высокие требования к погрешности измерений (менее 2,5 %).

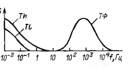


Рис. 1.2. Спектр частот $S(f)$ источника сообщения ТИ, ТС и ТФ.

Для сообщений ТУ, ТС, ТИ характерна очень большая избыточность, превышающая избыточность информации в речи. Это связано со сравнительно редкими включениями управляемых агрегатов и редкими отклонениями от нормального режима работы. Использовать эту избыточность информации для повышения эффективности передачи путем уплотнения сигналов в одном канале трудно из-за недопустимости больших запаздываний. В многоканальных системах такое уплотнение каналов реализуется.

Для сообщений управления при передаче допустимо только сравнительно небольшое запаздывание, в несколько раз меньшее постоянной времени (времени переходного процесса) управляемого объекта. Длительность передачи одной команды выбирается менее длительности допустимого запаздывания.

Специфика входных и выходных устройств. Информационные системы предназначены для обмена сообщениями между оператором (диспетчером) или ЭВМ и объектами контроля и управления.

В связи с этим на входе системы измерений включаются первичные преобразователи, выделяющие информацию без участия человека, а на выходе— записывающие или указывающие (воспроизводящие) выходные приборы, преобразующие сообщение в форму, удобную для восприятия ее человеком или для ввода информации в управляющую машину (ЭВМ).

На входе системы контроля включаются первичные преобразователи сигнализации (контактные или бесконтактные), осуществляющие первичный отбор информации без участия человека, а на выходе — устройства отображения световой и звуковой сигнализации или записывающие устройства.

На входе устройств управления, передающих информацию в обратном направлении, устанавливаются ключи, кнопки, реле и другие устройства для передачи команд, а на выходе — исполнительные органы объектов управления. В отличие от этого источником и приемником информации в системе связи является человек. Входными и выходными устройствами в системе телефонной связи служат микрофон и телефон, а в системе телевидения — иконоскоп и кинескоп.

Специфика требований к достоверности передачи сообщений. Допустимая вероятность возникновения ложной команды при управлении и телеуправлении составляет 10^{-8}—10^{-13}, а допустимая вероятность подавления команды в условиях возможности ее повторения равна нескольким процентам. При использовании ЭВМ или при записи сигнала высокие требования предъявляются и к сообщениям сигнализации и измерения (допустимая вероятность искажения примерно равна 10^{-6}). В отличие от этого в системах передачи речи и телеграмм допустима достоверность передачи, во много раз меньшая.

Специфика структурных схем. Объекты контроля и управления соединены с одним-двумя пунктами управления, т. е. существуют подчиненность и значительная централизация в структуре системы. Обмен информацией производится между местными и центральными пунктами контроля и управления, в то время как в технике связи обмен информацией осуществляется между всеми или между многими пунктами, т. е., как правило, возможна децентрализованная структура системы.

Специфика аппаратуры и способов разделения каналов. В системах телемеханики применяются специфические кодирующие, декодирующие устройства и способы разделения каналов. Это вызвано в первую очередь тем, что преобразователи, кодирующие и другие устройства тракта передатчик—приемник в системах измерения должны иметь высокостабильный коэффициент передачи (отношение значений выходного и входного параметров). Допустимая нестабильность коэффициента передачи

преобразователей составляет доли процента, так как изменение коэффициента передачи на величину δ вызывает примерно такую же погрешность. Особенности аппаратуры вызваны также сравнительно низким быстродействием и небольшой полосой частот, требуемой для одного канала (порядка одного или нескольких герц).

Информацию в системах телемеханики часто приходится передавать по телефонным (300—3400 Гц) и телеграфным (120—140 Гц) каналам связи. В этом случае каждый из каналов часто используется для образования многих вторичных каналов. Узкополосные каналы вторичного уплотнения с временны́м, частотным или кодовым разделением существенно отличаются от систем уплотнения в связи.

Ранее была рассмотрена специфика *оперативной информации* в системах промышленного применения, отличающейся тем, что при этом информационные процессы протекают в *реальном масштабе* времени. Такая информация используется для оперативного контроля и управления в реальном масштабе времени с допустимым запаздыванием, во много раз меньшим постоянной времени объектов контроля и управления.

В информационных системах также широко используется *статистическая* и *отчетная информация* для контроля, планирования и управления в нереальном масштабе времени, со значительно большими допустимыми запаздываниями. Такая информация вырабатывается в результате статистической, логической и другой обработки по более сложным критериям и обычно передается в цифровой или буквенно-цифровой форме. Требования к достоверности информации определяются обычно требованиями ЭВМ (допустимые искажения $P < 10^{-6}$).

К характеристикам статистической информации относятся математическое ожидание, интегральные значения, средняя квадратическая погрешность и другие статистические характеристики измеряемого параметра. К отчетной информации относятся количество выпускаемой продукции, процент брака, количество энергии на единицу продукции и т. п.

1.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СООБЩЕНИЙ В ДИСКРЕТНЫЕ СИГНАЛЫ

Сигналы разделяются на *дискретные* и *непрерывные* как по параметру, так и во времени. К дискретным относятся команды управления типа «включить», «выключить», сооб-

щения сигнализации типа «включено», «выключено» и значения параметров, передаваемых при дискретном импульсно-кодовом измерении или многопозиционном управлении (*многопозиционные команды*). *Дискретное* по параметру сообщение имеет *конечное* число значений.

Передача и хранение дискретных сообщений математически соответствуют передаче и хранению конечного набора символов и могут быть сведены к передаче и хранению последовательности чисел. Это справедливо для всех дискретных сообщений.

Непрерывные сообщения представляют собой непрерывные функции времени с бесконечным числом промежуточных точек. Такие сообщения передаются при измерении, если измеряемый параметр может принимать в определенных пределах *любое значение* (а не только дискретное). К непрерывным сообщениям также относятся команды управления, которые передаются в виде непрерывно изменяющихся величин, например таких, как значение, на которое необходимо открыть щит шлюза, и т. п.

В гл. 2 будет показано, что для передачи непрерывных сообщений без погрешности необходим канал связи с бесконечной пропускной способностью. На практике всегда передача сообщений осуществляется с ограниченным спектром частот и точностью, так как все каналы имеют ограниченную пропускную способность.

Если непрерывное сообщение имеет ограниченный спектр частот, оно всегда может быть передано своими значениями в отдельные моменты времени, т. е. может быть превращено в дискретное во времени сообщение, состоящее из последовательного во времени ряда значений.

Возможность такой замены была впервые установлена и сформулирована в 1933 г. В. А. Котельниковым в виде следующей теоремы: «Если функция $\lambda(t)$ не содержит частот выше F_m, Гц, то она полностью определяется своими мгновенными значениями в моменты времени, отстоящие друг от друга на $^1/_2F_m$». Функцию с ограниченным спектром можно записать в виде тригонометрического ряда

$$\lambda(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda(t - k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_m (t - k\Delta t)}{2\pi F_m (t - k\Delta t)}, \qquad (1.1)$$

где k — порядковый номер отсчета функции.

При этом функция вполне определяется своими мгновенными значениями $\lambda(k\Delta t)$, отсчитанными через равные

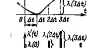


Рис. 1.3. Разложение функции $\lambda(t)$ с ограниченным спектром частот по В. А. Котельникову.

дискретные интервалы времени $\Delta t = \frac{1}{2}F_m$, называемые интервалами дискретизации (рис. 1.3).

Свойства ряда (1.1) основываются на свойстве функции $(\sin x)/x$, равной 1 при $x=0$ и равной 0 при x, кратных π (180, 360, 540° и т. д.).

Физический смысл преобразования состоит в том, что каждый член ряда (1.1) представляет собой отклик идеального фильтра нижних частот с граничной частотой среза F_m на очень короткий импульс, возникающий в момент времени $k\Delta t$ (рис. 1.3) и имеющий площадь, равную мгновенному значению функции $\lambda(t)$.

Интересным свойством ряда (1.1) является то, что значение ряда в момент $k\Delta t$ определяется только k-м членом ряда, так как все другие члены в этот момент времени обращаются в нуль:

$$\frac{\sin 2\pi F_m (t - k\Delta t)}{2\pi F_m (t - k\Delta t)} = \begin{cases} 1 \text{ при } t = k\Delta t; \\ 0 \text{ при } t = i\Delta t \, (i \neq k). \end{cases} \qquad (1.2)$$

Следовательно, несмотря на то что выходные функции перекрываются, значение заданной функции в момент отсчета определяется только одним из ее значений.

Согласно теореме Котельникова для однозначного представления функции с ограниченным спектром на интервале времени T достаточно иметь n значений этой функции, т. е.

$$n = T/\Delta t = 2F_m T. \qquad (1.3)$$

Аналогичные результаты можно получить для функций со спектром частот в промежутке от f_1 до f_2.

Таким образом, *непрерывное сообщение сводится к сигналу в виде последовательности импульсов, амплитуда*

которых равна значению исходной функции, передаваемой в дискретные моменты времени $k\Delta t$, а интервалы между ними

$$\Delta t = 1/2F_m. \qquad (1.4)$$

При выполнении условия (1.4) непрерывная и дискретная во времени функции обратимы между собой (тождественны).

Для преобразования дискретной функции в непрерывную нужно включить идеальный фильтр нижних частот с частотой среза (высшей пропускаемой частотой) F_m.

Рассмотренный процесс преобразования непрерывного сообщения в дискретный во времени сигнал называется дискретизацией во времени.

В отличие от изложенного процесс преобразования непрерывной функции в дискретную по параметру (уровню) носит название квантования по параметру и состоит в следующем. В диапазоне непрерывных значений функции $\lambda(t)$ выбирается конечное число дискретных значений функции, распределенных, например, равномерно по всему диапазону (рис. 1.4). В произвольный момент времени значение функции $\lambda(t)$ заменяется ближайшим дискретным по параметру значением (рис. 1.4, *а*). Функция при этом приобретает ступенчатый вид.

Шагом квантования по параметру называется разность между соседними дискретными значениями функции. Для равномерного квантования шаг квантования Δ постоянный:

$$\Delta_{кв} = (\lambda_{max} - \lambda_{min})/(q - 1),$$

где q — число шагов квантования.

Для $q = 1000$ и $\lambda_{max} - \lambda_{min} = 1$ $\Delta_{кв} = 100/(1000 - 1) \approx \approx 0{,}1$ %.

При квантовании функции $\lambda(t)$ по параметру ее значения в соответствующие моменты времени заменяются ближайшими дискретными значениями (рис. 1.4, *а*). Тогда непрерывная функция $\lambda(t)$ будет проходить через точки ступенчатой функции, соответствующие серединам интервалов квантования, т. е. переход от одного дискретного значения к другому происходит в момент пересечения середины интервала квантования непрерывной функцией $\lambda(t)$ (рис. 1.4, *а*).

Абсолютная погрешность квантования по параметру, как следует из рис. 1.4, *а*, может изменяться от 0 до $\Delta_{кв}/2$.

Соответственно приведенная погрешность $\delta_{кв}$, отнесенная к диапазону изменения $\lambda(t)$, будет изменяться в следующих пределах:

$$0 < \delta_{кв} \leqslant \Delta_{кв}/2\,(\lambda_{max} - \lambda_{min}) = \frac{1}{2}(q-1).$$

Можно принять все значения $\delta_{кв}$ от 0 до $^1/_2(q-1)$ равновероятными. Средняя квадратическая погрешность квантования $\delta_{кв.ск}$ определяется через дисперсию

$$D(\delta_{кв}) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\delta_{кв})\,\delta_{кв}^2\,d\delta_{кв} = \delta_{кв}^2,$$

где $S(\delta_{кв})$ — плотность вероятности погрешности квантования.

В рассматриваемом случае при равномерном распределении погрешности от 0 до $^1/_2\,(q-1)$

$$S(\delta_{кв}) = q - 1,$$

тогда

$$D(\delta_{кв}) \int_{-\Delta_{кв}/2}^{+\Delta_{кв}/2} (q-1)\,\delta_{кв}^2\,d\delta_{кв} = \frac{1}{12\,(q-1)^2};$$

$$\delta_{кв.ск} = \sqrt{D(\delta_{кв})} = \frac{1}{\sqrt{12}\,(q-1)}, \tag{1.5}$$

где $\delta_{кв.ск}$—среднеквадратическая погрешность квантования.

Так, для допустимой средней квадратической погрешности квантования $\delta_{кв.ск}=0{,}2$ % число шагов равномерного квантования

$$q = 1/\delta_{кв\,ск}\sqrt{12} + 1 = 1/0{,}002\sqrt{12} + 1 = 144.$$

Квантование позволяет уменьшить влияние слабых помех. Действительно, если помеха не превосходит половины интервала между двумя соседними уровнями квантования, то она не вызывает искажения дискретного сообщения. Кроме того, для квантованного сигнала можно избежать накопления слабых помех при ретрансляциях, если они по уровню не превышают половины шага квантования.

В соответствии с изложенным выше сообщения и сигналы разделяются на четыре вида: непрерывные, дискретные во времени, дискретные по параметру и дискретные по параметру и во времени.

Сигналы, дискретные по параметру, называются квантованными. На рис. 1.5, *а* приведен сигнал одновременно дискретный во времени и по параметру.

Для уменьшения избыточности сигналов (см. гл. 2), что позволяет увеличить пропускную способность каналов свя-

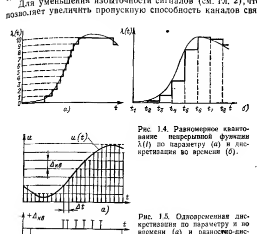


Рис. 1.4. Равномерное квантование непрерывной функции $\lambda(t)$ по параметру (*а*) и дискретизация во времени (*б*).

Рис. 1.5. Одновременная дискретизация по параметру и во времени (*а*) и разностно-дискретная модуляция (*б*).

зи путем увеличения скорости передачи, при дискретизации передают не все дискретные значения параметров, а, например, только те, которые отличаются от предыдущих по значению, или только приращения параметра. Существует ряд таких способов передачи, обладающих определенными свойствами. К простейшим из них относятся разностно-дискретная модуляция (РДМ) и Δ-модуляция. При РДМ передаются только приращения параметра на постоянный шаг квантования, т. е. на +1 или −1, в зависимости от полярности приращения в моменты, когда параметр изменился на шаг квантования (рис. 1.5, *б*). Если параметр не изменяется, то импульсы не передаются. В отличие от РДМ Δ-модуляция требует циклической передачи, т. е.

Δt=const. При этом в каждый цикл, например, передается +1 или −1. Положительные и отрицательные свойства разностных видов модуляции рассмотрены в гл. 5.

1.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ

В простейшей одноканальной системе передачи сообщений (см. рис. 1.1) сообщение подается в передатчик, который преобразует его в сигнал, пригодный для передачи по каналу связи. Канал вносит непостоянное затухание и может иметь паразитные возмущения в передаваемом поле (помехи).

Каналом связи называется совокупность технических средств и тракта для передачи сообщений на расстояние независимо от других каналов. Канал связи образуется в линии связи: проводной, радиолинии, линии энергоснабжения и т. п.

Линия связи представляет собой совокупность оконечной аппаратуры и физической среды или тракта, по которым происходит передача (распространение) сигналов от передатчика к приемнику (околоземное или космическое пространство, проводная или кабельная линия и т. п). Одна линия связи может быть использована для образования многих каналов с независимой передачей сообщений, если ее полоса пропускания значительно шире суммарной полосы пропускания канала связи. Число каналов, размещаемых в одной линии связи, определяется ее полосой пропускания, спектром сигналов и уровнем помех в линии. Канал связи начинается с входа передатчика и кончается выходом приемника (см. рис. 1.1).

Один общий канал связи может использоваться для образования многих вторичных, более узкополосных каналов с независимой передачей сигналов. В этом случае к одному передатчику подключается ряд источников сообщений. На приемной стороне производится разделение сигналов на соответствующие сообщения, пригодные для восприятия их человеком, или для ввода в машину, или для подачи на объект управления.

Процесс автоматического преобразования сообщения в сигнал происходит в передатчике, который включает в себя одну или несколько из следующих операций: *преобразование, кодирование, модуляцию.* Эти операции могут выполняться раздельно или совмещенно.

Преобразование используется для изменения носителя

информации или самой передаваемой функции по определенному закону, обеспечивающему однозначное соответствие между выходной функцией преобразователя и входной.

Применяется как линейное, так и нелинейное преобразование. Линейная зависимость используется обычно для преобразования неэлектрических величин (скорости, давления, уровня, расхода и т. п.) в электрические (напряжение или электрический ток), более удобные для передачи и последующих преобразований. Стабильность коэффициента передачи преобразователя является важнейшим фактором, влияющим на выбор типа преобразователя.

При измерениях широко используются такие преобразования, как линеаризация, масштабирование, преобразование координат и т. д.

В дискретных системах широко применяется нелинейное преобразование, при котором исходная функция заменяется другой, обычно дискретизированной, квантованной по уровню. В частном случае квантование сводится к передаче всего двух уровней, соответствующих, например, включенному и выключенному состояниям объекта.

Нелинейное преобразование также применяется в системах измерений для растягивания отдельных участков диапазона в целях повышения точности передачи на этих участках, а также в некоторых специальных системах для упрощения аппаратуры.

Кодирование является универсальным способом отображения информации для ее передачи, хранения, обработки в виде системы соответствий между элементами дискретных сообщений и сигналами. Широко применяются дискретные кодовые сигналы в виде совокупности комбинаций импульсов, для которых существует система соответствий с элементами сообщений для каждого кода. При кодировании происходит преобразование дискретных сообщений в дискретные сигналы в виде комбинаций импульсов по определенной системе данного кода, а при декодировании — обратный процесс однозначного восстановления сообщений.

Кодированием в широком смысле слова называют любое преобразование сообщения в определенный сигнал путем установления между ними однозначного соответствия. Кодирование может включать в себя процессы преобразования, дискретизации, модуляции и кодирования в узком смысле слова. Обратная операция называется *декодированием*.

Модуляцией называется процесс управления одним из параметров переносчика информации, например значением постоянного тока, частоты, амплитуды, фазы синусоидального или импульсного тока, акустической, электромагнитной или другой волны, под воздействием передаваемого сигнала (модулирующей функции времени). *Переносчиком* информации является модулируемая функция времени.

Обычно применяют линейную модуляцию, при этом зависимость между значением воздействия и значением модулируемого параметра выбирается линейной. Модуляция в большинстве случаев применяется для переноса спектра частот из области нижних частот в область более высоких частот, при согласовании сигнала с каналом связи по спектру.

Модуляция переменного синусоидального напряжения (переносчика)

$$u(t) = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{1.6}$$

может осуществляться по амплитуде U_m, частоте ω или фазе φ. Возможна также одновременная модуляция, например по частоте и амплитуде и т. п.

Выражения для синусоидального напряжения, модулированного нормированной функцией $\lambda(t)$ (изменяющейся от -1 до $+1$) соответственно для *амплитудной* (АМ), *частотной* (ЧМ) и *фазовой* (ФМ) модуляций, имеют вид

$$\left.\begin{aligned} u(t)_{\text{АМ}} &= U_m\,[1 + m\lambda(t)]\sin(\omega_0 t + \varphi_0);\\ u(t)_{\text{ЧМ}} &= U_m \sin\left[\omega_0 t + \omega_{\text{д}}\int_0^t \lambda(t)\,dt + \varphi_0\right];\\ u(t)_{\text{ФМ}} &= U_m \sin[\omega_0 t + \varphi_{\text{д}}\lambda(t) + \varphi_0], \end{aligned}\right\} \tag{1.7}$$

где $\omega_{\text{д}}$ — девиация частоты (диапазон изменения частоты); $\varphi_{\text{д}}$ — максимальное изменение фазы колебаний; m — глубина модуляции.

Еще больше возможностей в выборе способов модуляции имеется при импульсной модуляции. Могут быть построены системы с *амплитудно-импульсной* (АИМ), *частотно-импульсной* (ЧИМ), *фазо-импульсной* (ФИМ), *время-импульсной* (ВИМ), *широтно-импульсной* (ШИМ) и различными видами *кодо-импульсной* модуляции (КИМ). Временные диаграммы для различного вида модуляции приведены на рис. 1.6.

При фазо-импульсной и время-импульсной модуляциях интервал времени между начальной фазой (началом отсчета) или маркерным (синхронизирующим) и информационным импульсами

$$\tau = \tau_0 + \Delta\tau\lambda(t),$$

где τ_0, $\Delta\tau$ — постоянные интервалы времени; $\lambda(t)$ — нормированная модулирующая функция, изменяющаяся от —1 до +1.

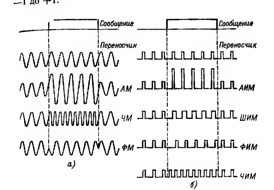


Рис. 1.6 Виды модуляции синусоидальных (*а*) и импульсных колебаний (*б*).

Отличие ФИМ от ВИМ заключается главным образом в методе синхронизации. Если в ВИМ используется пошаговый метод синхронизации и при приеме выделяется (измеряется) интервал времени между синхронизирующим и информационным импульсами, то в ФИМ применяется циклическая, стартстопная синхронизация со стабильной тактовой частотой и измеряется при приеме интервал времени между условной начальной фазой и информационным импульсом. Для ВИМ допускается большее изменение тактовой частоты, но помехоустойчивость может быть меньшей.

Применяются также системы с двойной и тройной модуляцией (АМ—ЧМ, ФИМ—ЧМ, ФИМ—АМ и др.), при ко-

торых два или три вида модуляции осуществляются последовательно Так, при двойной модуляции АМ—ЧМ сначала производится амплитудная модуляция, а затем частотная.

Процесс выделения первичной (модулирующей) функции из принятого сигнала в приемнике называется демодуляцией или детектированием. Модуляция и демодуляция являются частными случаями преобразования сигнала.

Модуляция и демодуляция позволяют перемещать спектр первичного сигнала по оси частот. Некоторые виды модуляции, например частотная, позволяют также повысить помехоустойчивость передачи сигналов.

Как отмечалось ранее, модуляция и кодирование применяются для преобразования сообщения в такой сигнал, который был бы лучше приспособлен для передачи по реальному каналу связи с помехами и изменяющимся во времени затуханием с заданной полосой частот. Они также применяются, если требуется уплотнение канала, заключающееся в передаче по общему каналу связи нескольких сигналов, т. е. для перехода к многоканальной передаче с временным, частотным или кодовым разделениями сигналов, описанными далее.

В процессе модуляции модулирующая функция $\lambda(t)$ изменяет значение модулируемого параметра переносчика информации (см. рис. 1.6). Модуляция постоянного тока используется в измерительных системах интенсивности. Естественно, что для передачи сигналов с модуляцией постоянного тока требуется канал связи в виде физической проводной линии, пропускающей постоянный ток с полосой частот, начиная от 0. Крупным недостатком такой модуляции в телеизмерении является прямая зависимость погрешности телеизмерений от изменения параметров канала связи (коэффициента передачи).

Значительно больше возможностей открывается при использовании для модуляции переменного или импульсного тока. В этом случае необязательно иметь физическую проводную линию, так как сигналы могут передаваться через трансформаторы, конденсаторы, линии, уплотненные по частоте, и т. п. Больше возможностей открывается и в выборе видов модуляции.

1.4. СПЕКТРЫ СИГНАЛОВ

Спектральное представление сигналов дает возможность определить, как передать с допустимым искажением по форме сигнал через электрические цепи, имеющие всегда

ограниченную полосу пропускания. Это в первую очередь относится к сравнительно узкополосным цепям и устройствам, электрическим фильтрам, усилителям, преобразователям, каналам связи и пр.

В основе спектральных методов лежит разложение периодических функций в ряд Фурье. Напомним основные правила разложения периодических и непериодических функций, широко используемого при описании сигналов.

Произвольная периодическая функция $\lambda(t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле (ограниченная, кусочно-непрерывная, имеющая конечное число экстремальных значений в течение периода) и условию периодичности, имеет вид:

$$\lambda(t) = \lambda(t + nT), \tag{1.8}$$

где T — период; n — любое целое положительное число.

Такая функция может быть представлена рядом Фурье в комплексной форме:

$$\lambda(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} C_k e^{jk2\pi f_1}. \tag{1.9}$$

Сумма слагаемых вида $C_k e^{jk2\pi f_1}$ берется по всем целым k от $-\infty$ до $+\infty$. Каждое слагаемое, называемое *гармоникой*, представляет собой синусоидальное колебание с частотой kf_1, кратной *основной частоте* (первой гармонике):

$$f_1 = 1/T.$$

Комплексная амплитуда $C_k = c_k e^{-j\varphi_k}$, где $c_k = |C_k|$ — модуль амплитуды колебаний данной гармоники; φ_k — начальная фаза данной гармоники.

Вычисление комплексной амплитуды (коэффициента разложения) производится однозначно по формуле

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} \lambda(t)\, e^{-jk2\pi f_1 t}\, dt. \tag{1.10}$$

Из однозначности коэффициентов разложения в ряд Фурье следует, что для рассматриваемых функций существует физический ряд гармоник с амплитудой, вычисленной по формуле (1.10). Это подтверждается экспериментально с помощью анализаторов спектра.

Перейдем к определению спектра непериодических функций. Следует заметить, что непериодическую функцию можно рассматривать как периодическую с периодом $T \to \infty$.

При таком переходе сумма в выражении (1.9) заменится интегралом, а дискретные значения круговых частот — текущей частотой $\omega = 2\pi f$, изменяющейся от $-\infty$ до $+\infty$.

Спектральное представление непериодической функции с помощью интеграла Фурье в комплексной форме имеет вид:

$$\lambda(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \qquad (1.11)$$

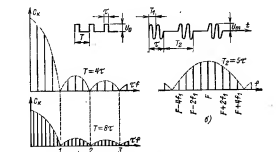


Рис. 1.7. Спектры периодических сигналов.

а — последовательности импульсов прямоугольной формы: частоты гармоник $F_1 = 1/T$; $F_к = k/T$, амплитуды гармоник $C_0 = \tau u_0/T$, $C_к = (u_0/\pi k)\sin 2\pi k F_1$ (для $\tau \neq T/2$), $k = 1, 2, 3 ...$; *б* — последовательности импульсов, содержащих целое число периодов синусоид, $u = U_m \sin 2\pi F$, $F = 1/T_1$; $f_1 = 1/T_2$; частоты гармоник $F_к = k/T_2$; амплитуды гармоник $C_к = \tau U_m/T_2$ для $f_1 = F$ и $\tau = T_2/2$; $C_к = (U_m/\pi k) \times \sin \pi k(\tau/T_1)$ для $F \pm k/T_2$, $k = 1, 2, 3 ..$

где величина

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(t) e^{-j\omega t} dt \qquad (1.12)$$

называется *спектральной плотностью* функции $\lambda(t)$, которая должна также удовлетворять условиям Дирихле.

В отличие от периодической функции, представляемой в виде суммы дискретных гармоник с интервалом по частоте $f_1 = 1/T$ и конечными амплитудами, непериодическую функцию можно представить в виде суммы бесконечного

числа бесконечно малых по амплитуде и бесконечно близких по частоте слагаемых. В соответствии с этим периодические функции имеют *дискретный спектр*, а непериодические — *непрерывный спектр* частот.

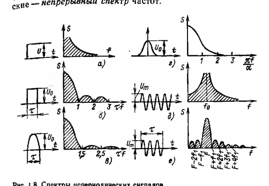


Рис. 1.8. Спектры непериодических сигналов.

а — включение постоянного напряжения, $S = U/2\pi^2 f$; *б* — импульс прямоугольной формы, $S = (U_0/\pi f)\sin \pi\tau f$; *в* — импульс косинусоидальной формы, $S = \frac{2\tau U_m}{\pi^2} \frac{\cos \pi\tau f}{1-(2\tau f)^2}$, $x = \frac{\cos \pi\tau f}{1-(2\tau f)^2}$; *г* — импульс колокольной формы, $u(t) = Ue^{-a^2 t^2}$, спектр которого $S = \frac{\sqrt{\pi}\, u_0}{a} e^{-(\pi f/a)^2}$; *д* — включение синусоидального напряжения, $S = \frac{f}{2\pi^2 (F-f)} U_m$; *е* — импульс длительностью τ, состоящий из целого числа периодов синусоиды, $S = \frac{fU_m}{2\pi^2 (F^2 - f^2)} (-1)^n \sin n\pi \times \times \frac{f}{f_0}$.

Определим в качестве примера спектр одиночного импульса прямоугольной формы с амплитудой U_0 и длительностью τ. Спектральная функция такого импульса

$$S(\omega) = U_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega t}\, dt = -\frac{U_0}{j\omega} e^{-j\omega t} \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} = \frac{2U_0}{\omega} \sin \frac{\omega\tau}{2} . \quad (1.13)$$

На рис. 1.7 и 1.8 приведены спектры простейших периодических и непериодических сигналов, применяемых для

передачи сообщений. В подрисуночных подписях приведены выражения для амплитуд гармоник периодических сигналов и для модуля спектральной плотности (спектральной функции) для непериодических сигналов.

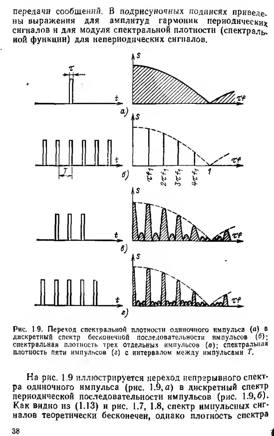


Рис. 1.9. Переход спектральной плотности одиночного импульса (*а*) в дискретный спектр бесконечной последовательности импульсов (*б*); спектральная плотность трех отдельных импульсов (*в*); спектральная плотность пяти импульсов (*г*) с интервалом между импульсами T.

На рис. 1.9 иллюстрируется переход непрерывного спектра одиночного импульса (рис. 1.9, *а*) в дискретный спектр периодической последовательности импульсов (рис. 1.9, *б*). Как видно из (1.13) и рис. 1.7, 1.8, спектр импульсных сигналов теоретически бесконечен, однако плотность спектра

уменьшается с увеличением частоты и поэтому реальный спектр ограничивается определенной частотой.

Шириной спектра импульсного сигнала принято называть полосу Δf, в которой сосредоточено 90 % энергии спектра, а *длительностью импульса произвольной формы* — временной интервал τ, которому соответствует 90 % всей энергии сигнала. В табл. 1.1 приведены значения τ, Δf и коэффициента широкополосности $\tau\Delta f$ для одиночных импульсов прямоугольной и колокольной форм (см. рис. 1.8).

Таблица 1.1

Форма импульса	τ	Δf	$\tau\Delta f$
Прямоугольная	0,9	$0{,}81/\tau$	0,73
Колокольная	$1{,}17/\alpha$	$0{,}38\alpha$	0,44

Из рис. 1.7 и 1.8 следует, что спектр импульсов *прямоугольной* формы ограничивается полосой

$$\Delta f = 1/\tau, \qquad (1.14)$$

при которой $\tau f = 1$ (см. рис. 1.8, *б*).

Из рис. 1.9, *а* и *б* следует, что формы спектральной плотности одиночного импульса и огибающей спектра периодической последовательности импульсов одинаковы, т. е. ширина спектра у них одна и та же и определяется длительностью импульсов τ, а первая гармоника f_1 определяется периодом повторения импульсов:

$$f_1 = 1/T.$$

Из всех возможных импульсов импульс, имеющий колокольную форму, занимает наименьшую полосу частот. Для его образования импульс прямоугольной формы пропускается через фильтр с частотной характеристикой, имеющей гауссовскую (колокольную) форму:

$$\lambda(t) = Ue^{-\alpha^2 t^2}$$

Рассмотрим амплитудно-модулированные колебания. Синусоидальное колебание с частотой ω_0, модулированное по амплитуде с глубиной модуляции $m \leqslant 1$ функцией $\lambda(t)$, описывается функцией

$$u(t) = U_0 [1 + m\lambda(t)] \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \qquad (1.15)$$

где $U_0[1+m\lambda(t)]$ — амплитуда несущей частоты; $\lambda(t)$ — нормированная модулирующая функция, изменяющаяся от $+1$ до -1.

Для косинусоидальной модулирующей функции времени

$$\lambda(t) = \cos\Omega(t),$$

где Ω — значительно более низкая частота, чем ω.

Используя формулу для произведения косинусов и синусов, функцию (1.15) запишем в следующем виде:

$$u(t) = U_0\{\sin(\omega_0 t + \varphi_0) + m\sin(\omega_0 t + \varphi_0)\cos\Omega t\} = \\ = U_0\{\sin(\omega_0 t + \varphi_0) + (m/2)\sin[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] + \\ + (m/2)\sin[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0]\}. \quad (1.16)$$

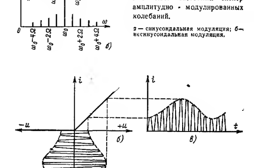


Рис 1.10. Частотный спектр амплитудно - модулированных колебаний.

а — синусоидальная модуляция; б — несинусоидальная модуляция.

Рис. 1.11. Детектирование амплитудно-модулированных колебаний.

а — колебания на входе детектора; б — характеристика линейного детектора; в — ток в выходной цепи детектора.

Из (1.16) следует, что **амплитудно-модулированное колебание имеет дискретный спектр** (рис. 1.10, *а*), состоящий [при $\lambda(t) = \cos \Omega t$] из трех дискретных частот: несущей (основной) ω_0 и двух боковых — нижней $\omega_0 - \Omega$ и верхней $\omega_0 + \Omega$.

Таким образом, при синусоидальной линейной амплитудной модуляции помимо несущей частоты ω_0 возникают две боковые дополнительные частоты $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$, что фактически означает *перенос (трансформацию)* модулирующей частоты Ω в область более высоких частот.

Ширина спектра линейного АМ высокочастотного сигнала больше ширины спектра модулирующего сигнала $\lambda(t)$ в 2 раза (рис. 1.10, *а*). Ширина спектра колебаний, модулированных импульсами прямоугольной формы, в соответствии с (1.14) и данными на рис. 1.10 будет иметь вид:

$$\Delta f_{AM} = 2/\tau. \tag{1.17}$$

Если модулирующая функция периодична и представлена в виде суммы гармоник

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(k\Omega t + \varphi_k), \tag{1.18}$$

где $k = 1, 2, 3...$, то амплитудно-модулированное колебание запишется в следующем виде:

$$u(t) = U_0 \left[1 + m \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(k\Omega t + \varphi_k)\right] \sin(\omega_0 t + \varphi_0) =$$

$$= U_0 \left\{\sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m}{2} \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos[(\omega_0 - k\Omega) t + \varphi_0 + \varphi_k] + \right.$$

$$\left. + \frac{m}{2} \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos[(\omega_0 + k\Omega) t + \varphi_0 + \varphi_k]\right\}. \tag{1.19}$$

Спектр такого колебания приведен на рис. 1.10, *б*. Здесь спектр частот амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала также в 2 раза шире спектра частот модулирующей функции $\lambda(t)$.

При демодуляции колебаний происходит восстановление модулирующей функции $\lambda(t)$, т. е. *обратный перенос* (трансформация) спектра в область более *низких частот*.

Простейший детектор, имеющий линейно-ломаную ха-

рактеристику с точкой излома при $u=0$ (рис. 1.11, *б*), пропускает неискаженно только составляющие модулированных колебаний (рис. 1.11, *а*) одной полярности (рис. 1.11, *в*). Такой детектор используется как демодулятор амплитудно-модулированных колебаний.

Напряжение на выходе двухполупериодного линейного детектора

$$u_д(t) = U_0(1 + m\sin\Omega t)|\sin\omega_0 t|.$$

Разложим модуль $|\sin\omega_0 t|$ в ряд Фурье:

$$|\sin\omega_0 t| = \frac{2}{\pi}\left(1 - 2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\cos 2k\omega_0 t}{4k^2-1}\right),$$

тогда

$$u_д(t) = \frac{2}{\pi}U_0\left[1 + m\sin\Omega t - 2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\cos 2k\omega_0 t}{4k^2-1} - \right.$$

$$\left. - 2m\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\cos 2k\omega_0 t}{4k^2-1} - 2m\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin\Omega t + \cos 2k\omega_0 t}{4k^2-1}\right]. \quad (1.20)$$

В этом выражении первый член представляет собой постоянную составляющую, второй — модулирующую функцию, а третий и четвертый — высокочастотные составляющие, которые задерживаются фильтром низких частот, включаемым на выходе детектора и не пропускающим частоты выше Ω. Высокочастотные составляющие третьего члена в (1.20) представляют собой четные гармоники с частотами $2k\omega_0$, а четвертого — четные гармоники с частотами $2k\omega_0 \pm \Omega$. Спектры частот модулирующего и продетектированного колебания при амплитудной модуляции приведены на рис 1 12.

Заметим, что на выходе реального детектора, характеристика которого отличается от линейно-ломаной линии (рис 1 11, *б*), возникают нелинейные искажения При двухполупериодном детектировании дополнительно к низкочастотной составляющей Ω возникают высшие четные гармонические составляющие 2Ω, 4Ω ., а при несимметричном двухполупериодном детектировании — также нечетные гармоники 3Ω, 5Ω

В информационных системах широко применяются амплитудная модуляция постоянного тока или напряжения

импульсами прямоугольной формы, которые называются видеоимпульсами (см рис 1.7, *а*). Если последовательность таких импульсов с частотой

$$f = 1/T$$

модулирует синусоидальное колебание по амплитуде с глубиной модуляции $m=1$, то на выходе амплитудного модулятора, осуществляющего АМ-модуляцию, получается последовательность импульсов, называемых радиоимпульсами, или импульсами переменного тока (см. рис. 1.7, *б*).

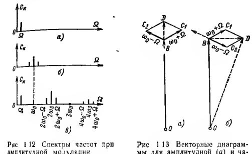


Рис 1.12 Спектры частот при амплитудной модуляции

а — синусоидальное модулирующее колебание *б* — амплитудно модулированное колебание *в* — спектр частот на выходе линейного детектора без выходного фильтра нижних частот

Рис 1.13 Векторные диаграммы для амплитудной (*а*) и частотной (*б*) модуляций.

Спектры таких последовательностей приведены на рис 1.7, *а* и *б* Ширина спектра последовательности радиоимпульсов при амплитудной линейной модуляции, как отмечалось ранее, в 2 раза больше ширины спектра видеоимпульсов.

Рассмотрим спектр частотно-модулированного сигнала. Запишем выражение для мгновенного значения колебания, модулированного по частоте или фазе синусоидальным колебанием с более низкой частотой Ω, считая начальный сдвиг фаз по высокой и низкой частотвм равным нулю·

$$u = U_0 \sin(\omega_0 t + m \sin \Omega t), \qquad (1.21)$$

где $m = \omega_д/\Omega$ — индекс (глубина) частотной модуляции;

ω_0 — частота модулируемого колебания ($\omega_0 \gg \Omega$); $\omega_д$ — максимальное отклонение или девиация частоты.

Произведя тригонометрические преобразования и (1.19), получаем:

$$u = U_0 [\cos(m \sin \Omega t) \sin \omega_0 t + \sin(m \sin \Omega t) \cos \omega_0 t]. \quad (1.22)$$

Рассмотрим сначала случай, когда глубина модуляции малая, т. е. $m \ll 1$, тогда $m \sin \Omega t \ll 1$, следовательно, в (1.22) $\sin(m \sin \Omega t) \approx m \sin \Omega t$; $\cos(m \sin \Omega t) \approx 1$.

Подставив эти выражения в (1.22), получим:

$$u \approx U_0 [\sin \omega_0 t + m \sin \Omega t \cos \omega_0 t]. \quad (1.23)$$

Используя формулу для произведения синусов и косинусов, получаем:

$$u(t) = U_0 [\sin \omega_0 t + (m/2) \sin(\omega_0 + \Omega) t - (m/2) \sin(\omega_0 - \Omega) t]. \quad (1.24)$$

Сравнивая (1.24) с (1.16) (при $\varphi = 0$), видим, что спектры частотно- или фазо-модулированных и амплитудно-модулированных колебаний при малой глубине модуляции ($m \ll 1$) состоят из трех дискретных частот (см. рис. 1.10, *а*): несущей ω_0, нижней боковой $\omega_0 - \Omega$ и верхней боковой $\omega_0 + \Omega$. Отличие (1.16) от (1.24) состоит в наличии знака минус перед третьим членом — составляющей нижней боковой частоты ($\omega_0 - \Omega$) в (1.24). Это соответствует сдвигу фаз на 180° составляющей $\omega_0 - \Omega$ при частотной модуляции относительно амплитудной.

На рис. 1.13 приведены векторные диаграммы для амплитудной и частотной модуляций при $0 < m < 1$. Из сравнения этих диаграмм видно, что трем дискретным частотам в (1.16) и (1.24) соответствуют векторы $OB(\omega_0)$, $BC_1(\omega_0 + \Omega)$ и $BC_2(\omega_0 - \Omega)$. Если при амплитудной модуляции вектор модуляции BD и результирующий вектор OD всегда совпадают по фазе с вектором несущей частоты OB (рис. 1.13, *а*), то при частотной и фазовой модуляциях (рис. 1.13, *б*) вектор BD перпендикулярен вектору несущей частоты OB. Вектор OD, изображающий результирующее колебание, изменяется по фазе (рис. 1.13, *б*). При малой глубине модуляции ($m \ll 1$) длина вектора BD во много раз меньше длины вектора OB. В этом случае изменениями амплитуды результирующего вектора OD можно пренебречь и модуляция может рассматриваться как чисто фазовая (рис. 1.13, *б*). Ширина спектра при амплитудной и частотной модуляциях для $m \ll 1$

одинакова и равна 2Ω (см. рис. 1.10, *а*). Следовательно, при малой глубине модуляции ($m \ll 1$) ширина спектра не зависит от глубины модуляции m и от частоты девиации $\omega_д = m\Omega$.

Если глубина модуляции возрастает и условие $m \ll 1$ не выполняется, то векторная диаграмма на рис. 1.13, *б* уже не дает правильного представления, так как периодические изменения фазы или частоты колебания в значительном диапазоне приводят к появлению бесконечно большого числа дополнительных частот, а спектр частот расширяется с увеличением m и становится значительно шире спектра частот амплитудно-модулированных колебаний.

Мгновенное значение частоты частотно-модулированных колебаний

$$\omega = \omega_0 + \omega_д \lambda(t), \tag{1.25}$$

где $\lambda(t)$ — нормированная функция, изменяющаяся в пределах от +1 до −1; ω_0 — среднее значение частоты при $\omega_д = 0$.

Следовательно, частота при модуляции изменяется от $\omega = \omega_0 - \omega_д$ для $\lambda(t) = -1$ до $\omega = \omega_0 + \omega_д$ для $\lambda(t) = +1$.

Мгновенное значение частоты равно производной от фазы колебания ψ:

$$\omega = d\psi/dt.$$

Тогда, подставляя ω в (1.25), получаем:

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t)\,dt = \omega_0 t + \omega_д \int_0^t \lambda(t)\,dt. \tag{1.26}$$

Для частотно-модулированного сигнала

$$u_{ЧМ} = U_0 \sin\psi(t) = U_0 \sin\left[\omega_0 t + \omega_д \int_0^t \lambda(t)\,dt\right]. \tag{1.27}$$

Для синусоидальной формы модулирующего колебания с частотой Ω, подставляя $\lambda(t) = \cos\Omega t$ в (1.27), получаем:

$$u_{ЧМ} = U_m \sin\left[\omega_0 t + (\omega_д/\Omega)\sin\Omega t\right]. \tag{1.28}$$

Выражение (1.28) соответствует (1.21), так как $m = \omega_д/\Omega$.

Для определения спектра частотно-модулированного сигнала в общем случае выражение (1.22) нужно разло-

жить в ряд Фурье. В более простом случае при синусоидальной форме низкой частоты модуляции, в ряд Фурье следует разложить выражение (1.28), тогда

$$u_{ЧМ} = U_0 \left\{ J_0(\omega_д/\Omega) \sin \omega_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(\omega_д/\Omega) \left[\sin(\omega_0 + k\Omega) t + (-1)^k \sin(\omega_0 - k\Omega) t \right] \right\}, \qquad (1.29)$$

где $k=1, 2, 3...$; J — функция Бесселя.

Из (1.29) следует, что частотно-модулированный сигнал представляет собой сумму колебаний с несущей частотой ω_0 и бесконечным числом пар боковых частот, кратных модулирующей частоте Ω. Амплитуда боковых частот определяется по таблице для функции Бесселя $J_к$.

Ширина спектра частот при ЧМ

$$\Delta\omega_{ЧМ} \approx 2(\omega_д + \Omega) = 2\Omega(m+1). \qquad (1.30)$$

Для определения ширины спектра при ЧМ и несинусоидальной форме модулирующего сигнала в (1.28) следует подставить наивысшую частоту, присутствующую в спектре $\lambda(t)$, т. е. $\Omega = \Omega_{max}$.

Применяется частотная модуляция с различной глубиной и формой модулирующего сигнала. Определим в качестве примера минимальную полосу частот канала связи, необходимую для одноканальной системы телеизмерения с частотной модуляцией, при следующих данных: несущая частота $f_0=2000$ Гц, пределы изменения частоты ± 10 %, высшая частота сигнала телеизмерения, поступающая от первичного преобразователя на вход частотного модулятора, $F_m=5$ Гц.

1. Девиация частоты $f_д$ равна максимальному отклонению частоты в одну сторону. В данном случае отклонение равно 10 % f_0, т. е. $f_д=0{,}1 \cdot 2000=200$ Гц.

2. В соответствии с (1.30) ширина спектра частотно-модулированных колебаний

$$\Delta f_{ЧМ} = 2(f_д + F_M) = 2(200+5) = 410 \text{ Гц}.$$

Канал связи при этом должен иметь минимальную полосу частот $\Delta f_{ЧМ} = 410$ Гц и пропускать частоты от (2000—205) Гц до (2000+205) Гц.

Стоимость линии и канала связи во многих случаях настолько велика, что их использование для одного объекта управления или измерения экономически неэффективно. Так, стоимость даже проводной линии связи длиной более 5—10 км значительно выше стоимости аппаратуры телемеханики. Поэтому общую линию или канал связи по экономическим соображениям стремятся использовать для передачи сообщений многим объектам или сообщений от многих объектов.

Следовательно, при телепередаче сигналов целесообразно осуществлять *уплотнение* одного канала связи или линии связи, например телемеханики *многими* вторичными *каналами*, так как информационные процессы протекают медленно и в полосе частот канала связи может быть резерв для вторичного его уплотнения. Передача ряда независимых сообщений по одной линии или каналу связи требует специальных устройств для вторичного уплотнения на передающей стороне и для разделения сообщений на приемной стороне. Система с общей линией или каналом связи, по которой организовано несколько независимых вторичных каналов, называется *многоканальной системой*. Такой способ передачи сигналов называется *многоканальным*.

Особым способом разделения каналов является пространственное разделение, называемое также кондуктивным. При этом способе между источниками и приемниками информации существуют индивидуальные каналы связи и нет общего канала связи. При других способах вторичного разделения каналов используется общая линия или канал связи, т. е. разделение сигналов эквивалентно разделению каналов.

На рис. 1.14 приведена обобщенная схема многоканальной системы с общим каналом связи. На передающей стороне сообщения от n источников $И_1$, $И_2$,..., $И_n$ поступают на n передатчиков, которые вырабатывают соответствующие сигналы, пригодные для их разделения в дальнейшем. Далее сигналы подаются на общий линейный усилительный блок и затем в общую линию или канал связи. На приемной стороне сигналы из линии поступают на n разделителей, каждый из которых выделяет сигнал своего канала. Выделенные сигналы в приемнике превращаются в сообщения и поступают на получатели сообщений $ПС_1$—$ПС_n$.

В простейшем случае при передаче по каналу связи пе-

редающее устройство может выполнять только функции уплотнения канала связи вторичными каналами, а приемное — только разделения вторичных каналов. Тогда структурная схема многоканальной системы упрощается, так как разделители выполняют функции приемников (рис. 1.15).

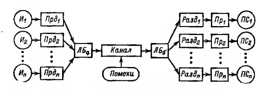


Рис. 1.14. Структурная схема многоканальной системы

$И_1$—$И_n$ — источники сообщений; $Прд_1$—$Прд_n$ — передатчики; $ЛБ_а$—$ЛБ_б$ — линейные блоки; $Разд_1$—$Разд_n$ — разделители; $Прм_1$—$Прм_n$ — приемники; $ПС_1$—$ПС_n$ — приемники сообщений.

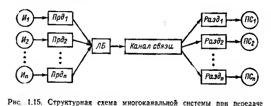


Рис. 1.15. Структурная схема многоканальной системы при передаче через канал связи видеоимпульсов.

$И_1$—$И_n$ — источники сообщений; $Прд_1$—$Прд_n$ — передатчики; ЛБ — линейный блок; $Разд_1$—$Разд_n$ — разделители; $ПС_1$—$ПС_n$ — приемники сообщений.

Упрощенную структурную схему может иметь также многоканальная система с общим модулятором и демодулятором для всех n каналов, включенных последовательно с линейной аппаратурой, соответственно на передающей и приемной сторонах. В структурной схеме такой многоканальной системы в отличие от схемы на рис. 1.15 включен общий модулятор на передающей стороне и общий демодулятор на приемной стороне.

Многоканальная система отличается от одноканальной наличием на приемной стороне разделительных (селектирующих) устройств, выделяющих и пропускающих свой канальный сигнал и не пропускающих сигналы других каналов.

Для разделения (селекции) необходимо, чтобы сигналы различных каналов отличались некоторыми признаками, получившими название *избирающих*. На передающей стороне многоканальной системы должно быть устройство, придающее сигналам разных каналов избирающие признаки с целью разделения (селекции) их на приемной стороне.

Разделение различных сигналов может быть осуществлено во времени, по частоте, фазе, амплитуде, форме импульсов и другим признакам.

В многоканальных системах с независимо работающими каналами наибольшее применение получили временное и частотное разделения, так как частотные и временные признаки являются независимыми.

В отличие от них такие избирающие признаки, как амплитуда, фаза, форма импульса, полярность и др., относятся к зависимым признакам; они позволяют организовать в одной линии связи весьма ограниченное число каналов, во многих случаях не превышающее двух, так как по общему каналу связи, например, невозможно передать одновременно сигнал нескольких амплитуд. Число каналов в системе с частотным и временным разделением достигает сотен и тысяч, причем временное разделение каналов и сигналов применяется значительно чаще, так как для него требуется более простая аппаратура.

На рис. 1.16 приведена структурная схема n-канальной системы с частотным разделением. Слева изображено передающее устройство, справа — приемное. Оба устройства соединены линией связи. Электрические сигналы $x_1,..., x_n$, получаемые, например, с первичных преобразователей, подаются на индивидуальные модуляторы $M_1,..., M_n$. На вторые входы каждого из модуляторов подается модулируемое напряжение переменного тока от канальных генераторов. Генераторы отдельных каналов $\Gamma_1,..., \Gamma_n$ имеют различные частоты $f_1,..., f_n$. Этим достигается разделение сигналов по частоте, что аналогично частотному разделению радиостанций, например, широковещательного диапазона. Частоты $f_1, f_2,..., f_n$ генераторов выбираются так, чтобы спектры сигналов отдельных каналов не перекрывались (рис. 1.17).

Для устранения высших гармонических составляющих и других паразитных частот на выходе каждого модулятора устанавливаются полосовые фильтры $Ф_1, ..., Ф_n$, пропускающие только полезные (рабочие) частоты, расположенные вблизи частот $f_1, f_2, ..., f_n$ соответствующего генератора.

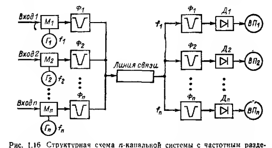


Рис. 1.16 Структурная схема n-канальной системы с частотным разделением каналов.

$M_1—M_n$ — модуляторы; $Г_1—Г_n$ — генераторы; $Ф_1—Ф_n$ — полосовые фильтры; $ВП_1—ВП_n$ — выходные приборы, $Д_1—Д_n$ — демодуляторы.

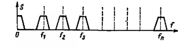


Рис. 1.17 Спектры сигналов в многоканальной системе с частотным разделением.

В результате амплитудной модуляции происходит перенесение (трансформация) спектра источника сообщений $S(f)$ (рис. 1.17) в область более высоких, например звуковых, частот по обе стороны частот $f_1, ..., f_n$ генераторов. Аналогичный перенос частот происходит при частотной и других видах модуляции.

На приемной стороне сигналы каждого канала выделяются индивидуальными полосовыми фильтрами $Ф_1, ..., Ф_n$, пропускающими рабочую полосу частот только своего канала, при этом фильтр $Ф_1$ пропускает частоту f_1 и ближай-

ние к ней частоты в пределах спектра $S(f)$ и т. д. После демодуляции ($Д_1, ..., Д_n$) индивидуальные сигналы, имеющие спектр $S(f)$, подаются на выходные приборы или другим получателям сообщений ($ВП_1, ..., ВП_n$). Для усиления сигнала в линию или какую-либо другую часть системы включаются соответствующие усилители.

Суммарный диапазон занимаемых многоканальной системой частот

$$\Delta f_\Sigma = 2\sum_{i=1}^{n} F_{mi} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta f_{3i}, \qquad (1.31)$$

где F_{mi} — высшая частота в низкочастотном спектре $S(f)$; Δf_{3i} — защитный интервал частот i-го канала.

Идеальный полосовой фильтр пропускает колебания всех частот в пределах полосы пропускания и задерживает колебания частот, лежащих вне полосы пропускания, т. е. за пределами полосы пропускания фильтр имеет бесконечно большое затухание.

Полосы пропускания идеальных фильтров можно размещать по оси частот без защитных интервалов. В реальных полосовых фильтрах за пределами полосы пропускания затухание возрастает с удалением частоты от резонансной. Вследствие этого для устранения взаимных помех между каналами полосы пропускания реальных фильтров отделяются защитными интервалами. Для фильтров, применяемых в телеграфной и телефонной связи в диапазоне частот от 300 до 3400 Гц с полосой пропускания от 120 до 3400 Гц, защитные интервалы занимают полосу около нескольких десятков процентов полосы пропускания фильтра.

Значительно труднее обеспечить защитные интервалы во вторичных каналах с полосой пропускания менее 100 Гц.

Сложность изготовления высокоизбирательных узкополосных фильтров и возможное изменение уровней сигналов заставляют выбирать в частотных системах телемеханики сравнительно большие защитные интервалы, во многих случаях превышающие рабочую полосу частот.

Применение высокоизбирательных электромеханических, например камертонных, полосовых фильтров позволяет уменьшить удельный вес защитных интервалов и повысить эффективность использования канала связи.

На рис. 1.18 приведена структурная схема 8-канальной системы с временным разделением сигналов. Здесь два одинаковых распределителя (переключателя) $П_1$ и $П_2$ по-

очередно и согласованно переключают цепи на передающей и приемной сторонах (синхронно и синфазно). Соединение с линией связи i-го передатчика и соответствующего ему i-го приемника происходит одновременно. Если послать сигнал, например, со второго передатчика, то цепь

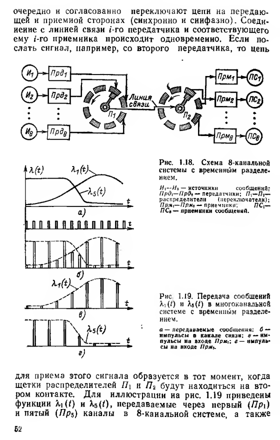


Рис. 1.18. Схема 8-канальной системы с временным разделением.

$И_1$—$И_8$ — источники сообщений; $Прд_1$—$Прд_8$ — передатчики; $П_1$—$П_2$ — распределители (переключатели); $Прм_1$—$Прм_8$ — приемники; $ПС_1$—$ПС_8$ — приемники сообщений.

Рис. 1.19. Передача сообщений $\lambda_1(t)$ и $\lambda_5(t)$ в многоканальной системе с временным разделением.

а — передаваемые сообщения; *б* — импульсы в канале связи; *в* — импульсы на входе $Прм_1$; *г* — импульсы на входе $Прм_5$.

для приема этого сигнала образуется в тот момент, когда щетки распределителей $П_1$ и $П_2$ будут находиться на втором контакте. Для иллюстрации на рис. 1.19 приведены функции $\lambda_1(t)$ и $\lambda_5(t)$, передаваемые через первый ($Пр_1$) и пятый ($Пр_5$) каналы в 8-канальной системе, а также

сигналы на входе первого и пятого приемников при работе распределителей (рис. 1.19, *в* и *г*).

Время цикла (период работы распределителя) $T_ц$ и длительность передачи сигнала в одном из каналов (время соединения передатчика с соответствующим приемником) $\tau_р$ (рабочее время распределителя) связаны неравенством $T_ц/\tau_р > N$, где N — число переключаемых цепей (каналов).

Если при частотном разделении каналов из-за неидеальных характеристик полосовых фильтров необходимы защитные интервалы по частоте, то при временно́м разделении каналов для каждого канала необходимы временны́е защитные интервалы

$$\tau_з = \tau_{з.н} + \tau_{з.р},$$

где $\tau_{з.н}$ — время нестационарных процессов (передачи и приема); $\tau_{з.р}$ — время допустимого рассогласования двух распределителей.

Время цикла распределителя с одинаковыми каналами

$$T_ц = N(\tau_р + \tau_з).$$

Для неодинаковых каналов

$$T_ц = \sum_{i=1}^{i=N} (\tau_{рi} + \tau_{зi}), \tag{1.32}$$

где $\tau_{рi}$ и $\tau_{зi}$ — соответственно рабочий и защитный интервалы i-го канала.

Из сравнения (1.31) и (1.32) следует, что формулы для частотного и временного разделения аналогичны.

Принимаемый сигнал после прохождения в приемнике через фильтр низких частот, не пропускающий тактовую и более высокие частоты, достаточно хорошо соответствует передаваемому сообщению, если тактовая частота переключения распределителя $F_т = 1/T_ц$ не менее определенного значения. Искажения, вносимые при такой многоканальной передаче, могут быть очень малыми.

По теореме Котельникова для передачи произвольной функции времени с высшей частотой спектра F_m достаточно передавать ее отдельные значения через интервалы времени

$$\Delta t \leqslant 1/2F_m.$$

В устройствах с реальными фильтрами низких частот интервалы выбирают в 3—4 раза меньше:

$$\Delta t = 1/(3 + 4)\,2F_m. \tag{1.33}$$

При ступенчатой интерполяции (см. рис. 1.4, *б*) возникает дополнительно бóльшая погрешиость квантования по уровню. В этом случае интервал квантования выбирается еще меньше:

$$\Delta t = 1/(10 \div 20)\,2F_m. \qquad (1.34)$$

Наибольшее приближение к формуле Котельникова достигается путем запоминания предшествующих и последующих дискретных значений функции и обработки результатов более совершенными методами интерполяции и экстраполяции. Тогда интервал квантования может отличаться в 1,2—1,5 раза от интервала, определяемого по формуле Котельникова:

$$\Delta t = 1/(1{,}2 \div 1{,}5)\,2F_m. \qquad (1.35)$$

Рассмотрим пример. В многоканальной системе телеизмерений с временным разделением каналов часто применяется ступенчатая аппроксимация. Тогда согласно (1.34) для высшей частоты непрерывного сигнала первичного преобразователя телеизмерения в каждом из каналов $F_m = 2$ Гц, при равномерном распределении времени цикла распределителя между каналами интервал квантования по времени

$$T_ц = \Delta t = 1/(10 \div 20)\,2F_m.$$

Выбираем $\Delta t = 1/(10 \cdot 2F_m) = 1/(10 \cdot 2 \cdot 2) = 0{,}025$ с.

Для 8-канальной системы телеизмерений ($N=8$) время передачи за цикл $T_ц$ сигнала с каждого первичного преобразователя

$$t_i = T_ц/k_з N = 0{,}025\,(1{,}3 \cdot 8) = 0{,}0024 \text{ с},$$

где $k_з$ — коэффициент, учитывающий защитиый интервал во времени между каналами. Выбираем $k_з = 1{,}3$.

При передаче сигналов измерений и управления высшая частота спектра (см. рис. 1.2)

$$F_m \approx (0{,}1 \div 10) \text{ Гц};$$

соответствеино выбирается период цикла $T_ц$.

Рассмотренный выбор параметров при временнóм разделении сигналов относится к автономной синхронизации распределителей. В реальных системах необходимо дополнительно учитывать интервал времени для синхроимпульса. Для выделения синхроимпульса его длительность τ_c,

например, в 1,5—3 раза превышает канальное время τ_i $[\tau_c = (1{,}5 \div 3)\,\tau_i]$, тогда

$$T_ц = N(\tau_р + \tau_з) + (1{,}5 \div 3)(\tau_р + \tau_з). \qquad (1.36)$$

Синхронизация работы передатчика и приемника при временном разделении каналов достигается синхронным и синфазным движением распределителей (переключателей), при этом i-й канал в передатчике соединяется с каналом связи в течение интервала времени $\tau_р$. В интервал времени $\tau_р$ канал связи должен быть соединен с i-м каналом в приемнике (см. рис. 1.18). Рассинхронизация каналов вызывает искажения, поэтому помехоустойчивость системы в большой степени определяется также помехоустойчивостью системы синхронизации.

Широко применяются следующие способы синхронизации и синфазирования, излагаемые в порядке увеличения их помехоустойчивости.

1. Пошаговый (шаговый), при котором каждый очередной импульс передающего устройства вызывает продвижение распределителя в приемнике на один шаг. Шаговый способ реализуется наиболее просто, он не требует периодической посылки импульсов и местного генератора в приемнике, однако имеет наиболее низкую помехоустойчивость, так как единичный импульс помехи приводит к рассинхронизации распределителей. Этот способ широко применялся при использовании электромеханических распределителей, например шаговых искателей, а при использовании электронной элементной базы его применение ограничено.

2. Циклический, или стартстопный способ, при котором распределители переключают каналы на передающей и приемной сторонах от местных генераторов, работающих со стабильной, почти одинаковой тактовой частотой

$$f_т \geqslant N f_ц = N/T_ц.$$

Запуск распределителей, начиная с первой позиции, производится каждый цикл стартовым синхроимпульсом или синхрокодом. Распределители в передатчике или приемнике останавливаются после прохождения всех N позиций (каналов) до момента прихода очередного циклически посылаемого синхроимпульса с частотой $f_ц$, который вновь запускает распределитель (стартстопный способ). Этот

способ допускает относительную нестабильность δ тактовой частоты (при одинаковых генераторах):

$$\delta \leqslant k_р/N,$$

где N — число каналов, $k_р$ — коэффициент допустимого рассогласования канала в распределителе ($k_р < 0,5$).

Следовательно, требования к стабильности частоты возрастают с увеличением числа каналов. Помехоустойчивость стартстопного способа значительно выше, так как единичный импульс помехи может вызвать рассогласование в движении распределителей только в пределах части цикла до прихода очередного синхроимпульса. Очередной синхроимпульс восстанавливает синхронное движение распределителей.

3. Инерционный способ, при котором, так же как и при стартстопном, циклически передаются синхроимпульсы. Однако распределители работают (продвигаются) от стабильных по частоте местных тактовых генераторов. Синхроимпульсы воздействуют (регулируют) на частоту одного из управляемых генераторов в небольших пределах. Для приема синхроимпульсов применяются стробирование и другие меры, способствующие уменьшению влияния помех в интервалы времени, в которые не ожидается приход синхроимпульса.

Этот способ синхронизации имеет повышенную помехоустойчивость и применяется при высоком уровне помех. Вопросы синхронизации рассматриваются далее при описании конкретных систем.

Перечисленные способы разделения каналов имеют детерминированный характер и не могут использовать избыточность сообщений, описанную в гл. 2. При детерминированных способах выбираются фиксированные резонансные частоты полосовых фильтров для частотного разделения и фиксированные частоты циклов и тактов при временно́м циклическом разделении, при этом невозможно или затруднено использование статистических зависимостей и избыточности сообщений.

С успешным развитием микроэлектроники в последние десятилетия все более широкое применение находят адресные передачи (см. гл. 3), называемые также временны́м кодовым разделением каналов (сигналов) и обладающие возможностью повышения пропускной способности каналов путем использования избыточности в передаваемых сигналах. Такая избыточность имеет место при передаче теле-

фонных разговоров и сигнвлов телемеханики. Так, современные космические телефонные, телеметрические каналы и современные системы промышленной телемеханики используют временное кодовое разделение в отличие от циклического временного.

В системах с кодовым разделением передающее устройство поочередно опрашивает источники информации с помощью электронного коммутатора с изменяющейся длительностью тактов. Если, например, в момент опроса i-го канала есть новая информация, то передается адрес i-го канала и текст (значение параметра) в виде кодовых сигналов. Если новая информация отсутствует, то производится быстрое переключение на $(i+1)$-й канал и т. д. На приемной стороне, например, коммутатор отсутствует и сигналы подаются параллельно на декодирующие устройства. Принимает текст только тот канал, адрес которого передан, т. е. образуется цепь для приема текста при передаче присвоенного адреса.

Существует ряд методов временно́го кодового разделения сигналов с разностно-дискретной модуляцией (РДМ) и разновидностями Δ-модуляции, рассмотренные ранее и в гл. 5, которые позволяют значительно повысить скорость передачи информации путем использования избыточности и статистических свойств сообщений.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

2.1. ИНФОРМАЦИЯ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Есть две основные формы существования информации: статическая — в виде различных записей на бумаге, ленте, фотобумаге и других материалах и динамическая — при ее передаче. В качестве примеров статической формы можно назвать запись на магнитной ленте, перфоленте, печатные и рукописные тексты, рисунки, комбинации состояний реле и т. п. Примерами динамической формы являются процесс передачи на расстояние речи, телеграмм и сигналов контроля и управления по электрическим, акустическим или другим каналам связи, при этом в каждой точке канала процесс непрерывно изменяется во времени. Заметим, что процесс физической перевозки писем, магнитных лент и других носителей информации не

относится к динамической форме существования информации. Информация, сохраняемая в любой записи, может считываться и передаваться на расстояние, записываться и вновь воспроизводиться без потерь, т. е. формы ее существования могут переходить одна в другую многократно.

Информация, записанная любым способом, с течением времени может разрушаться под действием коррозии и других физико-химических факторов. Потери информации также происходят при ее передаче под действием помех вследствие паразитных возмущений электрического, магнитного или другого поля, с помощью которого передается информация.

Понятие *информация* (см. гл. 1) очень емкое. Для ознакомления с ним на рис. 2.1 приведена классификация информации по различным критериям.

Для количественной оценки потерь информации при ее хранении или передаче необходимо умение объективно измерять количество информации. Знание количества информации нужно при выборе емкости хранилища информации и расчете пропускной способности канала связи. Необходимость количественной оценки информации и информационной емкости возникла первоначально в телеграфии для оценки скорости передачи информации.

Первая попытка ввести научно обоснованную меру информации была сделана в 1927 г. Р. Хартли (Англия). Он предложил и обосновал количественную меру, позволяющую сравнивать способность различных систем передавать информацию. Эта мера подходит для систем как передачи, так и хранения информации, поэтому с уточнениями, о которых будет сказано далее, она явилась отправной точкой для создания теории информации.

Естественным требованием, предъявляемым к информационной мере, должно быть требование аддитивности: количество информации, которое можно сохранить в двух однотипных ячейках, должно быть в 2 раза больше, а в n одинаковых ячейках в n раз больше, чем в одной ячейке.

Если ячейка для хранения информации имеет m возможных состояний, то две такие ячейки будут иметь m^2 возможных состояний, а n одинаковых ячеек — m^n возможных состояний. Следовательно, существует экспоненциальная зависимость между числом возможных состояний и числом ячеек. Учитывая эту зависимость для количественной оценки способности системы хранить или передавать ин-

формацию, Р. Хартли ввел логарифмическую меру информационной емкости:

$$C = \log m, \tag{2.1}$$

где m — число различных состояний системы.

Рис. 2.1. Классификация информации.

Такая мера удовлетворяет требованию аддитивности. Емкость устройства, состоящего из n ячеек, имеющего $q = m^n$ состояний, равна емкости одной ячейки, умноженной на число ячеек:

$$C = \log m^n = n \log m.$$

Из этого выражения следует, что если выбрать логарифм с основанием 2, то информационная емкость C хранилища будет равна эквивалентному числу двоичных ячеек с двумя возможными состояниями, совокупность которых обладает той же емкостью.

За единицу измерения информационной емкости принята двоичная единица, сокращенно bit (binary digit — двоичный знак), равная емкости одной ячейки с двумя возможными состояниями. Ячейка для хранения информации, например, имеющая 16 возможных состояний с емкостью

$$C = \log_2 16 = 4 \text{ бит},$$

эквивалентна емкости четырех двоичных ячеек.

Практически проще построить четыре двоичные ячейки, чем одну на 2^4—16 состояний, или в общем случае n двоичных ячеек, чем одну ячейку в 2^n состояний. Этим главным образом обусловлено широкое применение двоичных ячеек для хранения информации и измерения информационной емкости в двоичных единицах.

Информационная емкость C в двоичных единицах в общем случае определяется как

$$C = k_a \log_a m, \tag{2.2}$$

причем k_a — коэффициент, зависящий от основания логарифма a. При использовании для хранения информации десятичных ячеек для определения информационной емкости удобно пользоваться десятичными логарифмами. В этом случае

$$k_{10} = \log_2 10 \approx 3{,}32,$$

т. е. одна десятичная ячейка по информационной емкости равна 3,32 двоичным ячейкам. При дальнейшем изложении материала будут использоваться двоичные логарифмы, если не будет сделано специальных оговорок.

Р. Хартли ограничился рассмотрением информационной емкости как величины, характеризующей физическую систему. Дальнейшее развитие теории информации в 40-х годах шло в направлении учета статистических характеристик.

Если от источника информации по каналу связи передается сообщение о событии, априорная вероятность которого на передающей стороне равна P_1, то после приема сообще-

ння апостериорная вероятность этого события для приемника (получателя) информацин равна P_2.

Прнрост количества информации с учетом логарифмической меры

$$\Delta I = \log (P_2/P_1) = \log P_2 - \log P_1. \quad (2.3)$$

Для ндеального канала связи без помех и искажений прием сообщения становится достоверным событием, т. е. вероятность P_2 обращается в единицу, тогда из (2.3) следует, что

$$\Delta I = -\log P_1. \quad (2.4)$$

Из (2.4) следует, что чем меньше вероятность P_1, тем больше неопределенность исхода, т. е. тем большее количество информации содержится в принятом сообщении.

Значение P_1 находится в пределах $0 < P_1 < 1$, следовательно, $\Delta I = -\log P_1$ — всегда положительная величиниа. Так, чем реже бывает включенным контролируемый объект, т. е. чем меньше P_1 (объект включен), тем больший прирост информации получаем от прнема снгнала о включенни объекта. В пределе при $P_1 = 0$

$$\Delta I = \lim_{P_1 \to 0} (-\log P_1) = \infty.$$

Сигнал о том, что двухпозиционный объект при этом выключен, приносит малое количество ннформацин, так как вероятность выключения будет равна $1 - P_1$, а при $P_1 \to 0$

$$\Delta I = \lim_{P_1 \to 0} [-\log (1 - P_1)] = 0.$$

Следовательно, при $P_1 \to 0$ снгиал о том, что объект выключен, не несет информации.

Прирост количества информации $\Delta I = -\log P$, где P — вероятность событня, был положен в основу и был исходной точкой при создании теории информацин.

Рассмотрим дискретные сообщеиия, передаваемые отдельными снмволами. Отличающиеся друг от друга символы образуют алфавит. Так, в десятичной системе счисления алфавит состоит из десяти цифр (различных символов), в двоичной — нз двух (0 и 1), а русский — нз 33 букв (различных символов).

Рассмотрим среднее количество информации, приходящееся иа один снмвол (например, на одну букву в алфавите),

Допустим, что может передаваться n_A символов S_A, соответствующих событию A, n_B символов S_B, соответствующих событию B, и т. д., а всего m различных символов. Отличающиеся между собой символы S_A, S_B и другие образуют алфавит из различных m символов. Сумма всех символов q (одинаковых и отличающихся между собой — всего m групп символов)

$$q = n_A + n_B + \ldots$$

Аналогичная задача, например, возникает при подсчете количества информации на символ в Большой советской энциклопедии.

Согласно (2.4) прием символа S_A дает количество информации

$$\Delta I = -\log P_A,$$

где P_A — вероятность события A. Тогда в n_A символах содержится количество информации, равное $n_A(-\log P_A)$. Аналогично в n_B символах о событии B содержится количество информации, равное n_B $(-\log P_B)$ и т. д. Полное количество информации в сообщении из q символов

$$I_q = -(n_A \log P_A + n_B \log P_B + \ldots) = -\sum_{i=1}^{m} n_i \log P_i. \quad (2.5)$$

Выражение для определения среднего количества информации, приходящегося на один символ, получим, разделив (2.5) на q:

$$I_1 = -\sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{q} \log P_i. \quad (2.6)$$

Здесь суммирование производится по всем событиям A, B..., которые могут встретиться.

В (2.6) отношение n_i/q при $i=A$ есть априорная вероятность появления символа S_A для больших значений n_i и q, n_B/q — вероятность символа S_B и т. д. Следовательно, при $q \to \infty$

$$\lim_{q\to\infty} (n_i/q) = P_i$$

При этом сумма вероятностей

$$P_A + P_B + \ldots = 1,$$

так как одно из всех m событий A, B... происходит обязательно (полная вероятность событий).

Подставив выражение для P_i в (2.6), получим выражение для среднего количества информации на один символ:

$$I_1 = -\sum_{i=1}^{m} P_i \log P_i, \qquad (2.7)$$

где $\sum_{i=1}^{m} P_i = 1$; P_i — вероятность i-го символа.

Формула (2.7) выражает теорему К. Шеннона, согласно которой среднее количество информации, приходящееся на один символ (об одном из возможных состояний источника сообщений для независимых сообщений), получило название энтропии H и определяется из выражения

$$H = I_1 = -\sum_{i=1}^{m} P_i \log P_i. \qquad (2.8)$$

Энтропия H представляет собой логарифмическую меру беспорядочности состояния источника сообщений и характеризует среднюю степень неопределенности состояния этого источника. Получение информации — это процесс раскрытия неопределенности.

В информационных системах неопределенность снижается за счет принятой информации, поэтому численно энтропия H равна количеству информации I, т. е. является количественной мерой информации.

Если все m различных состояний источника равновероятны, т. е.

$$P_i = 1/m,$$

энтропия максимальна и из (2.8) имеем:

$$H_{max} = -\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{m} \log \frac{1}{m} = -m \frac{1}{m} \log \frac{1}{m} = \log m. \qquad (2.9)$$

Нетрудно заметить, что в частном случае при равновероятных сообщениях формулы (2.8) и (2.1) совпадают, т. е. количественная мера Шеннона (2.8) совпадает с мерой Хартли (2.1). Количество информации, заключенное в хранилище информации (емкости), на один символ равно при этом количеству информации, которое максимально может быть записано в хранилище с m возможными состояниями.

Если сообщения неравновероятны, то среднее количество информации, содержащееся в одном сообщении, будет

меньше. Для хранения таких сообщений может быть использовано хранилище с меньшей емкостью, однако для этого должно быть осуществлено предварительное перекодирование сообщений, в результате которого будет образована новая последовательность элементарных равновероятностных сообщений или близких к равновероятным.

Рассмотрим несколько примеров. Пусть передается текст, в котором использованы 32 буквы алфавита ($m=32$). Если все буквы равновероятны и вероятность появления любой из букв не зависит от предыдущего текста, то количество информации, содержащееся в одной букве (символе)

$$H_{max} = \log m = 5 \text{ бит}$$

на букву.

В качестве второго примера рассмотрим источник с двумя состояниями ($m=2$), например контролируемый объект, который может быть включен или выключен. Обозначим: P_1 — вероятность первого события (включен) и P_2 — вероятность второго события (выключен), тогда с учетом того что

$$P_1 + P_2 = 1,$$

по формуле К. Шеннона получаем:

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i \log P_i = -[P_1 \log P_1 + (1 - P_1) \log (1 - P_1)]. \tag{2.10}$$

Задаваясь $P_1 = 0 \div 1$, получаем:

$$H = \varphi(P_1).$$

Из рис. 2.2, на котором приведена эта зависимость, видно, что энтропия максимальна, если $P_1 = P_2 = 0{,}5$, т. е. когда оба события равновероятны.

Энтропия, а следовательно, и количество информации равны нулю ($H=0$), когда $P_1=0$ или $P_1=1$. Действительно, если достоверно известно, что объект включен ($P_1=1$), то сообщение об этом не несет никакой информации. Аналогично количество информации равно нулю, если достоверно известно, что объект выключен ($P_1=0$).

Количество информации, определяемое по (2.10), представляет собой среднее количество информации, приходящееся на один символ (элемент сообщения). Изложенное относится к системам как хранения, так и передачи инфор-

мации. Ранее было рассмотрено количество информации, создаваемое источником, так называемая энтропия источника сообщений на символ, при независимых символах.

Если символы между собой статистически зависимы, т. е. если известно, что после некоторых символов с большей вероятностью появляются какие-либо определенные другие символы, то энтропия такого источника будет меньше, чем при независимых символах. Взаимозависимость (корреляция) между символами уменьшает энтропию.

Рис 2 2 Энтропия H для двух возможных состояний с вероятностями P_1 и $1-P_1$.

Пусть для каждого i-го состояния задана совокупность вероятностей $P_i(j)$ перехода из состояния i в состояние j (i, $j=1, 2, ..., m$). Для состояния i может быть определена неопределенность этого состояния по отношению ко всем другим состояниям:

$$H_i = -\sum_{j=1}^{m} P_i(j) \log P_i(j). \qquad (2.11)$$

Энтропия источника H определяется как среднее значение по всем i значениям H_i с учетом вероятности i-го состояния P_i:

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i H_i = -\sum_{i=1}^{m} P_i \sum_{j=1}^{m} P_i(j) \log P_i(j). \qquad (2.12)$$

К основным недостаткам классической теории информации, ограничивающим ее применение, относится то, что при оценке количества информации не учитываются семантическое (смысловое) ее содержание и ценность. Например, если сигналы о срабатывании какого-либо второстепенного устройства и об аварии будут иметь одинаковые вероятности появления, то согласно теореме *Шеннона* в них будет содержаться одинаковое количество информации, хотя очевидно, что семантика и ценность этих сообщений существенно различны.

В теории информации в основном рассматриваются предельные возможности систем передачи информации с точки

зрения вероятностных критериев. В качестве крите[...] оценки канала связи используется значение его емкости, равное предельной пропускной способности. Доказывается, что если скорость передачи информации меньше пропускной способности, то информация может быть передана безошибочно. Для реализации такой передачи, однако, требуется большое запаздывание при кодировании и декодировании.

Допустимое запаздывание при передаче оперативной информации невелико, поэтому многие результаты теории информации в информационных системах не могут быть практически использованы. Вместе с тем знание основ теории информации полезно для понимания основных характеристик сообщений и некоторых методов передачи информации, в частности статистического кодирования.

2.2. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ БЕЗ ПОМЕХ

Принято определять ёмкость канала как предельную скорость передачи информации по этому каналу:

$$C = \lim_{T\to\infty} [(\log q)/T], \qquad (2.13)$$

где q — число элементарных сообщений, передаваемых за время T.

В общем случае здесь необходимо рассматривать отрезок времени $T\to\infty$. В частном случае для повторяющихся, циклических процессов T равно времени цикла.

Если сигналы передаются со скоростью S импульсов в секунду, т. е.

$$S = 1/\tau,$$

где τ — время передачи одного импульса, то за время T можно передать n импульсов:

$$n = T/\tau = ST.$$

Для бинарного (двоичного) канала, пропускающего только элементарные сигналы 0 и 1, максимальное число комбинаций элементарных сигналов, которое можно передать за время T,

$$q = 2^n = 2^{ST},$$

тогда емкость бинарного канала связи (бит/с)

$$C = \lim_{T\to\infty} [(\log q)/T) = (\log 2^{ST})/T = S, \qquad (2.14)$$

т. е. чем меньше длительность импульса $\tau=1/S$, тем больше емкость канала C.

Для небинарного канала за время передачи одного импульса τ может быть передано одно из m различных элементов сообщений (m — число различных символов в алфавите), тогда

$$q = m^{ST}$$

и емкость канала

$$C = \lim_{T\to\infty}[(\log q)/T] = (\log m^{ST})/T = S \log m, \qquad (2.15)$$

где q — число элементарных сигналов, которое можно передать за время T.

Примером такого канала связи является канал с дискретной амплитудно-импульсной модуляцией. Если в канале с АИМ импульсы квантованы по уровню с числом шагов квантования $m=64$, а длительность импульса $\tau=1/S=0{,}01$, то емкость канала

$$C = (\log m)/\tau = (\log 64)/0{,}01 = 600 \text{ бит.}$$

Емкость, или пропускная способность, канала связи C может быть выражена в двоичных единицах на символ (на элемент сообщения), при этом емкость бинарного канала $C_c=1$ бит/символ, а емкость приведенного выше канала с АИМ

$$C_c = \log m = 6 \text{ бит/символ,}$$

где m — число различных возможных состояний одного импульса, т. е. число различных символов в алфавите рассматриваемого канала связи.

Если ко входу канала подключен источник сообщений с энтропией на символ, равной емкости канала связи, то источник информационно согласован с каналом. Если энтропия источника меньше емкости канала, что может быть в случае неравновероятности состояний источника, то источник не будет согласован с каналом связи. Это означает, что емкость канала используется не полностью.

Согласование в статистическом смысле осуществляется с помощью так называемого статистического кодирования. К. Шеннон образно говорит, что информационное согласование, достигаемое статистическим кодированием, аналогично энергетическому согласованию внутреннего сопротивления электрического генератора с нагрузкой с помощью трансформатора для передачи от генератора максимальной

мощности. Здесь же имеется в виду согласование источника информации с каналом связи с помощью кодирующего устройства в смысле максимального использования емкости канала.

Для иллюстрации такого статистического кодирования рассмотрим две последовательности сообщений, представляющих собой, например, записанные через равные дискретные промежутки времени сигналы о состоянии двухпозиционного контролируемого объекта (включен или выключен):

$$\begin{matrix} 1\,1\,0\,0\,1\,0\,1\,1\,1\,1\,0\,1\,0\,0\,0\,1\,1\,1\,0\,1\,0\,1\,0\,0\,0\,1\,0\,1\,0\,0 \\ 0\,0\,1\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1\,1\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \end{matrix} \qquad (2.16)$$

Символу 1 соответствует сигнал «объект включен», а символу 0 — «объект выключен». Будем для простоты считать, что символы появляются независимо друг от друга.

Для первой последовательности символы 1 и 0 равновероятны (при $T = \infty$), а для второй вероятность первого символа $P_1 = 0{,}1$, второго $P_2 = 1 - P_1 = 0{,}9$.

Энтропия первой последовательности согласно (2.10)

$$H = -2 \cdot 0{,}5 \log 0{,}5 = 1 \text{ бит/символ.}$$

Энтропия второй последовательности

$$H_2 = -0{,}1 \log 0{,}1 - 0{,}9 \log 0{,}9 \approx 0{,}5 \text{ бит/символ.}$$

Следовательно, количество информации на символ во второй последовательности в 2 раза меньше, чем в первой.

При передаче последовательностей через бинарный канал связи с емкостью $C = 1$ бит/символ первая последовательность будет согласована с каналом ($H_1 = 1$), в то время как при передаче второй последовательности емкость бинарного канала на символ в 2 раза больше энтропии источника, т. е. канал будет недогружен и в статистическом смысле не согласован с источником ($C > H_2$).

Статистическое кодирование позволяет повысить энтропию передаваемых сообщений в пределе до значения, которое получается, если символы новой последовательности будут равновероятны, при этом число символов в последовательности будет сокращено. В результате источник информации согласуется с каналом связи.

Проиллюстрируем статистическое кодирование на примере второй последовательности ($P_1 = 0{,}1$; $P_2 = 0{,}9$; $H_2 \approx \approx 0{,}5$). Вторую последовательность (2.16) разобьем на

группы по три элемента в каждой. Считая, что элементы сообщений случайны и взаимонезависимы, т. е. что любой последующий элемент не зависит от предыдущих, вычислим вероятности возможных сочетаний элементов в каждой группе путем умножения вероятностей отдельных входящих в них элементов. Затем группам с большей вероятностью присвоим более короткие комбинации неравномерного двоичного кода без разделительных знаков. Техника такого кодирования изложена, например, в [43].

В табл. 2.1 приведены возможные группы последовательностей из трех соседних элементов, их вероятности и присвоенный группам код без разделительных знаков. Новая последовательность, полученная в результате статистического кодирования, будет иметь вид:

$$1\,1\,0\,0\,0\,1\,1\,1\,1\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \qquad (2.17)$$

Она состоит из 16 элементов (вместо 30). Отношение суммы элементов длины новой последовательности к первоначальной $\mu = 16/30 = 0{,}53$.

Таблица 2.1

Номер группы	Группа	Вероятность группы	Код группы	Номер группы	Группа	Вероятность группы	Код группы
1	000	$0{,}9^3 = 0{,}729$	0	5	110	$0{,}9 \cdot 0{,}1^2 = 0{,}009$	11100
2	100	$0{,}9^2 \cdot 0{,}1 = 0{,}081$	100	6	101	$0{,}9 \cdot 0{,}1^2 = 0{,}009$	11101
3	010	$0{,}9^3 \cdot 0{,}1 = 0{,}081$	101	7	011	$0{,}9 \cdot 0{,}1^2 = 0{,}009$	11110
4	001	$0{,}9^2 \cdot 0{,}1 = 0{,}081$	110	8	111	$0{,}1^3 = 0{,}001$	11111

Энтропия для новой последовательности (2.17) близка к 1 бит/символ, а число таких же элементов (0 и 1) примерно в 2 раза сокращено (16 вместо 30). Новая последовательность (2.17) может быть декодирована на приемной стороне однозначно.

В теории информации разрабатываются методы статистического кодирования, позволяющие увеличить энтропию передаваемого сообщения и сократить в нем избыточность. Для дискретных сообщений избыточность $И$ есть безразмерная величина, показывающая, какая доля исходного числа элементов сообщения может быть устранена с помощью статистического кодирования:

$$И = 1 - H/(\log m).$$

А. Я. Хинчин доказал, что, применяя оптимальное кодирование, можно достигнуть максимальной энтропии на выходе кодирующего устройства и полностью устранить избыточность. Формулировка его теоремы следующая: *если энтропия поступающего сообщения равна H, то нижняя грань коэффициента сжатия по всем возможным кодам*

$$\mu = H/(\log m). \qquad (2.18)$$

Статистическое кодирование становится тем эффективнее, чем больше энтропия H отличается от емкости

$$C = \log m.$$

При $H \ll \log m$ статистическое кодирование может дать большой эффект в ряде систем передачи информации. Статистическое кодирование требует определенной задержки в передаче элементов сообщения. При увеличении коэффициента сжатия эта задержка может возрастать.

В рассмотренном примере при кодировании второй последовательности использовалась задержка, несколько большая, чем продолжительность трех элементов сообщения. Кодирующее устройство на передающей стороне только после приема трех элементов сообщения решает логическую задачу, к какой группе эти элементы относятся, и после этого вырабатывает кодовую комбинацию, соответствующую данной группе. Кроме того, дополнительная задержка необходима и при декодировании.

Для передачи телеграмм и других сообщений, в которых последовательность символов уже записана, такие задержки допустимы. В системах автоматического или телемеханического оперативного управления информация должна передаваться между диспетчером или управляющим устройством и объектами управления без существенных задержек при передаче и приеме.

Если, например, приведенные последовательности элементов сообщения (2.16) есть последовательности команд (включить, выключить), передаваемых диспетчером или ЭВМ при управлении каким-либо объектом, то каждая команда должна быть передана и выполнена до передачи последующей команды. В системах управления, как правило, недопустима задержка, большая длительности передачи одной команды. Тем более недопустима задержка на три элемента сообщения, как это было для рассмотренного выше статистического кодирования второй последовательности. При больших различиях между C и H статисти-

ческое кодирование требует еще больших задержек для получения существенного сокращения избыточности в одном канале.

Все сказанное выше относится главным образом к системам, работающим в реальном масштабе времени. Исключениями могут быть системы, работающие в нереальном масштабе времени, например системы программного управления, в которых задержки создают временной сдвиг в исполнении команд, а также системы, в которых получаемая информация используется для совершенствования последующих образцов испытываемых объектов или используется статистическая и отчетная информация.

Необходимо также учесть, что статистическое кодирование может ухудшать помехоустойчивость передачи. Искажение отдельного элемента сигнала после статистического кодирования приводит к искажению целой группы элементов сообщения. Так, в закодированной последовательности (2.18) искажение любого элемента сигнала (переход любого $0 \to 1$ или $1 \to 0$) приводит по меньшей мере к искажению трех элементов сообщения второй последовательности (2.16).

Следовательно, устранение избыточности в сообщении путем статистического кодирования может ухудшать помехоустойчивость передачи. Правда, после статистического кодирования можно применить дополнительное кодирование, повышающее помехоустойчивость передачи (например, рассмотренные далее корректирующие коды). Но при таком кодировании значительно усложняется аппаратура.

В одноканальных системах оперативного управления, работающих в реальном масштабе времени, статистическое кодирование не применяется в том случае, когда недопустимо рассмотренное выше запаздывание. В многоканальных (многообъектных) системах широко используется статистическое кодирование по множеству объектов (см. гл. 3), отличающееся от описанного выше метода малой вероятностью возникновения запаздывания при передаче информации.

2.3. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПОМЕХАХ

Структурная схема передачи сообщений по каналу с шумами приведена на рис. 1.1. Шумы (помехи) в канале связи существенно усложняют передачу информации. На приемной стороне при наличии шумов нет уверенности, что

принято то сообщение или тот элемент сообщения, которые были переданы. Поэтому при передаче информации через канал с шумами возникают две проблемы: повышения эффективности передачи и повышения достоверности (помехоустойчивости) передачи. Эти основные проблемы в известной мере противоречивы.

Рассмотрим влияние шумов на передачу информации. Если из-за воздействия шумов принят элемент сообщения j, в то время как был передан элемент i, то прирост информации

$$\Delta I_{ij} = \log \frac{1}{P_i} - \log \frac{1}{P_j(i)} = \log \frac{P_j(i)}{P_i}, \qquad (2.19)$$

где P_i — априорная вероятность передачи элемента i; $P_j(i)$ — условная вероятность того, что был передан элемент сообщения (символ) i в то время, когда был принят элемент j.

Влияние шумов наглядно иллюстрируется двумя крайними случаями:

1) при очень больших шумах $[P_j(i)=P_i]$ из (2.19) получим:

$$\Delta I = \log 1 = 0,$$

т. е. принимаемое сообщение не содержит информации, а прием не изменяет первоначальных знаний;

2) при отсутствии шумов $[P_j(i)=1$, если $i=j$, $P_j(i)=0$, если $j \neq i]$

$$\Delta I = \log (1/P_i) = -\log P_i,$$

что совпадает с (2.4).

Скорость передачи информации R_c (в двоичных единицах на символ) в канале с шумами равна среднему по всем i и j значению прироста информации:

$$R_c = \sum_{i,j} P_i P_j(i) \Delta I_{ij} = H_i - H_j(i) = H_j - H_i(j), \quad (2.20)$$

где $H_i = -\Sigma P_i \log P_i$ — энтропия источника; $H_j = -\sum_j P_j \log P_j$ — энтропия сообщений на приемной стороне;

$$\left.\begin{aligned} H_i(j) &= -\sum_{ij} P_i P_i(j) \log P_i(j); \\ H_j(i) &= -\sum_{ij} P_j P_j(i) \log P_j(i). \end{aligned}\right\} \text{— условные энтропии.}$$

В канале без шумов

$$H_i(j) = H_j(i) = 0; \ R_c = H_i = H_j.$$

В канале с шумами скорость передачи информации (в двоичных единицах в секунду)

$$R = SR_c,$$

где S — число передаваемых символов в секунду;

$$R_c = H_i - H_j(i), \tag{2.21}$$

тогда

$$R = S[H_i - H_j(i)] \tag{2.22}$$

есть разность переданной и потерянной информации вследствие действия помех.

Рассмотрим пример бинарного канала с помехами со следующими данными. Вероятности передачи символов 0 и 1 одинаковы, т. е.

$$P_1 = P_2 = 0{,}5.$$

Емкость бинарного канала без помех $C=1000$ бит/с, а действие помех проявляется в том, что в среднем для 1 % передаваемых символов вместо 0 принимается 1 или, наоборот, вместо 1 принимается 0.

В данном примере для $P_1=P_2=0{,}5$ энтропия максимальна:

$$H_{max} = 1 \text{ бит/символ.}$$

Вероятность того, что при передаче 0 принимается 1 $P_1(0)=0{,}01$. Соответственно другие условные вероятности будут следующими:

$$P_0(0) = 0{,}99; \ P_0(1) = 0{,}01; \ P_1(1) = 0{,}99.$$

Величина $P_i(j)$ представляет собой условную вероятность того, что при передаче j-го символа будет принят символ i. Она связана с вероятностью $P_j(i)$ соотношением

$$P_i(j) = P_j P_j(i)/P_i. \tag{2.23}$$

Вычисленная по приведенным формулам энтропия

$$H_i = 1; \ H_i(j) = H_j(i) = 0{,}081.$$

Согласно (2.22) скорость передачи информации по каналу с шумами

$$R = S[H_i - H_j(i)] = 1000\,(1 - 0{,}081) = 919 \text{ бит/с.}$$

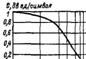


Рис. 2.3. Зависимость емкости C двоичного канала с шумами от вероятности искажения элемента сообщения P.

Таким образом, скорость передачи информации при воздействии шумов уменьшается более резко, чем число правильно переданных символов, равное в данном примере $0{,}99 \cdot 1000 = 990$. Это обусловлено тем, что на приемной стороне неизвестно, какие из переданных символов искажены.

На рис. 2.3 приведена зависимость емкости бинарного канала с шумами от вероятности искажения элементов сообщения P, рассчитанная для таких же условий, как и в рассмотренном примере. Приняты следующие вероятности переходов (симметричный канал):

$$P_0(1) = P_1(0) = P;\ P_0(0) = P_1(1) = 1 - P;\ P_0 = P_1 = 0{,}5,$$

при этом

$$H_i = H_j = 1.$$

Емкость канала C определялась по (2.10).

В теории информации при математическом описании канала с шумами обычно задается совокупность условных вероятностей приема j-го сообщения при передаче i-го сообщения $P_i(j)$ в виде канальной матрицы

$$\left\| \begin{matrix} P_1(1), & P_1(2) & \ldots & P_1(n) \\ P_2(1), & P_2(2) & \ldots & P_2(n) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ P_n(1), & P_n(2) & \ldots & P_n(n) \end{matrix} \right\|. \quad (2.24)$$

Пропускной способностью, или емкостью, канала с шумами называется максимальная скорость передачи информации на символ или в единицу времени при условии, что канал связи без шумов согласован с источником информации.

К. Шеннон доказал, что если энтропия источника информации не превышает пропускной способности канала, т. е. $H \leqslant C$, то существует код, обеспечивающий передачу информации через канал с шумами со сколь угодно малой частотой ошибок или сколь угодно малой недостоверностью. При $H > C$ такого кода не существует, т. е. невозможна передача без ошибок. Полученный Шенноном результат пред-

ставляет собой одиу из основных теорем теории ииформации.

К. Шенноном была определена пропускная способность, или емкость, канала связи при ограниченной средней мощности аналогового сигнала и равномерном спектре сигиала и помехи:

$$C = F_m \log (1 + W_c/W_ш), \quad (2.25)$$

где F_m — полоса частот канала; W_c — средняя мощность сигнала; $W_ш$ — средняя мощность белого шума (с равномерным спектром) с нормальным законом распределеиня амплитуд в полосе частот каиала связи.

Следовательно, можно передавать информацию по каиалу с помехами без ошибок, если скорость передачи информации

$$R \leqslant C = F_m \log (1 + W_c/W_ш). \quad (2.26)$$

Для $R > C$ при любой системе кодирования частота ошибок конечна, причем она быстро растет с увеличением R.

Из (2.26) следует, что для канала с высоким уровнем шумов, т. е.

$$W_c \ll W_ш,$$

емкость канала резко уменьшается. При малом отношении сигнал/помеха (2.26) можно разложить в ряд и ограничиться однни членом ряда, тогда

$$C = F_m \log (1 + W_c/W_ш) = F_m \log (e W_c/W_ш) = 1{,}44 F_m W_c/W_ш.$$

На рис. 2.4 приведена завнсимость пропускной способности канала связи C от отношення сигнал/шум при различных F_m.

При $W_ш > W_c$ канал связи обладает пропускиой способностью, хотя и меньшей. Применяя методы накопления, корреляции и помехоустойчивого кодирования, можно передавать информацию и при $W_ш > W_c$. Емкость (пропускная способность) канала связи с уменьшением шумов, как следует из (2.26), неограниченно возрастает. Однако реализовать канал с неограниченной пропускной способностью практическн невозможно из-за наличия аппаратурных погрешностей, уменьшающих пропускную способность и в этом смысле эквивалентных шумам.

При $W_c \gg W_ш$ в (2.26) единицей можно пренебречь, и тогда максимальная скорость передачи информации

$$R_{max} = F_m \log (W_c/W_ш). \quad (2.27)$$

Максимальное количество информации, которое мож передать за время T,

$$V = F_m T \log (W_c/W_ш) = F_m Th, \tag{2.28}$$

где $h = \log (W_c/W_ш)$ — мера превышения сигнала над помехой.

Величина

$$V = F_m Th \tag{2.29}$$

может быть представлена в виде параллелепипеда со сторонами F_m, T, h и поэтому получила название объема сигнала (рис. 2.5).

Рис 2.4. Зависимость пропускной способности канала связи от отношения мощностей сигнала и шума при различных частотах F_m.

Рис 2.5. Объем сигнала $V = F_m Th$.

Из (2.28) и рис. 2.5 следует: с точки зрения объема передаваемой информации параметры F_m, T и h равнозначны, так же как и для объема параллелепипеда равнозначны его высота, ширина и глубина.

Один и тот же объем сигнала может быть получен при уменьшении или увеличении одного из параметров путем пропорционального увеличения или уменьшения любого другого параметра соответственно.

Это позволяет осуществить преобразование сигналов путем изменения F_m, h или T без изменения объема сигнала.

Примерами такого преобразования с одновременным изменением F_m и T при постоянном объеме сигнала являются запись и воспроизведение сигналов с различной ско-

ростью на магнитофоне. Если скорость воспроизведения $C_в$ относительно скорости записи $C_з$ увеличивается в K раз, то во столько же раз увеличивается полоса частот и также в K раз уменьшается время воспроизведения при одном и том же h, т. е. неизменном объеме сигнала.

Путем выбора кода можно получить различный объем сигнала с различными F_m, h и T для одной и той же информации, при этом могут изменяться эффективность использования канала связи и помехоустойчивость передачи.

Непрерывные сообщения, используемые, например, в измерении, всегда передаются с ограниченной точностью, так как передача непрерывной функции с неограниченно малой погрешностью требует практически неосуществимого канала с неограниченно большой емкостью.

Если непрерывное сообщение передается с средней квадратической погрешностью $\delta_{ск}$, подчиненной нормальному закону распределения, то скорость передачи информации можно считать примерно равной

$$R = F_m \log\left(1/16\delta_{ск}^2\right). \qquad (2.30)$$

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

КОДЫ И КОДИРОВАНИЕ

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Кодом называется конечное множество целых рациональных чисел, сопоставляемых по определенному алгоритму с множеством сообщений. Это математическое понятие. В телемеханике и информационных системах под множеством рациональных целых чисел подразумевается множество (совокупность) дискретных сигналов в виде кодовых комбинаций. Поэтому кодированием называется преобразование дискретных сообщений в дискретные сигналы в виде кодовых комбинаций, а декодированием — обратный процесс однозначного восстановления передаваемых дискретных сообщений.

Код имеет следующие основные характеристики:

1. Основание кода m, равное числу отличающихся друг от друга символов в алфавите (называемых также буквами в алфавите). Простейший число-импульсный код имеет алфавит, состоящий из одних единиц. Так, при дискретизации значение параметра может быть представлено чис-

лом импульсов число-импульсного кода — это простейший вид кодирования с алфавитом, состоящим из одних единиц.

Все другие коды имеют алфавит, состоящий из двух ($m=2$ — двоичные коды) и более символов, отличающихся друг от друга. При использоваиии в процессе кодирования электрических импульсов m есть число различных избирающих признаков.

2. Длина кодовой комбинации n, называемая также разрядностью кода или длиной слова; n равно числу одинаковых или отличающихся друг от друга символов (элементарных сигналов) в кодовой комбинации. Для данного кода характерио свое множество (набор) кодовых комбинаций, каждая из которых может передавать отдельное дискретное сообщение. Код называется равномерным, если все кодовые комбинации одинаковы по длине ($n=\text{const}$), и неравномерным, если величина n в коде непостоянна.

3. Число кодовых комбинаций N в коде, каждая из которых может передавать свое отдельное сообщение. N называется также объемом кода.

Код удобно представить в виде матрицы K_{nN}, имеющей N строк и n столбцов, где K может принимать значения от 0 до $m-1$:

$$\left\| \begin{matrix} K_{11} & K_{21} & K_{31} & \dots & K_{n1} \\ K_{12} & K_{22} & K_{32} & \dots & K_{n2} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} & \dots & K_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{1N} & K_{2N} & K_{3N} & \dots & K_{nN} \end{matrix} \right\|. \tag{3.1}$$

Каждая строка матрицы представляет собой кодовую комбинацию, и если длина каждой строки постоянна ($n=\text{const}$), то код будет равномерным.

Число строк в матрице равно числу кодовых комбинаций N. Код называется полным, если $N=m^n$.

Для простейшего число-импульсного кода $m=1$, а $N=n_{max}$, т. е. максимальному числу символов (элементов комбинирования). Это неравномерный код (рис. 3.1, в центре). Во всех других кодах $N>n$ и определяется формулой кода.

Перечисленные характеристики есть у любого кода и кодовой комбинации независимо от представления кода, физической его реализации или способа передачи и хранения

кодовых комбинаций. Эти характеристики имеют обобщенный математический характер.

Кроме того, есть характеристики кодовых комбинаций, которые зависят от способа передачи и отображения. Так, по характеру передачи кодовых комбинаций они делятся на параллельный и последовательный способы передачи отдельных символов кода. При параллельной передаче все символы кодовой комбинации передаются одновременно, а при последовательной — поочередно (последовательно).

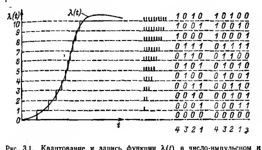


Рис. 3.1. Квантование и запись функции $\lambda(t)$ в число-импульсном и двоичном натуральном кодах.

Как отмечалось ранее, символы кода отображаются в виде элементарных электрических импульсов. Элементарные импульсы различаются по амплитуде, частоте или другим так называемым избирающим признакам, число которых в коде равно *m*.

При параллельной передаче кодовых комбинаций каждому разряду выделяется отдельная проводная линия или канал связи (например, частота) по максимальному числу разрядов кода *n*. Упрощенно такая передача называется *параллельным кодом*.

При последовательной передаче все кодовые комбинации и их элементарные импульсы передаются последовательно во времени по общей проводной линии или каналу связи. Упрощенно такая передача называется *последовательным кодом*.

Рассмотрим простейшие примеры. Квантованный отсчет (число), или, иначе говоря, номер передаваемого по уровню дискретного значения функции, может быть представлен равным ему числом импульсов число-импульсного кода. Например, для передачи числа $N=100$ необходимо послать 100 импульсов. Это приводит к неэкономному использованию канала связи. Более экономно передавать, например, раздельно десятки и единицы. Для того же числа $N \leqslant 100$ необходимо занять максимально только $2 \cdot 10 = 20$ временных позиций импульсов. Число импульсов на первых 10 позициях передает десятки, а на следующих 10 — единицы, поэтому такой код называется *единично-десятичным* и применяется в АТС для вызова абонента по телефону с помощью телефонного диска (номеронабирателя).

Еще меньшее число временных позиций импульсов при одной и той же точности требует двоичный код ($m=2$). Здесь каждое передаваемое число N получают суммированием членов. Формула двоичного кода следующая:

$$M = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \ldots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0,$$

где a_i может принимать только два значения: 0 или 1 (двоичный код); n — число разрядов кода.

В качестве примера запишем матрицу четырехразрядного равномерного двоичного кода, называемого натуральным, в следующем виде:

$$\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{Vmatrix}$$

Здесь в крайнем правом столбце записывается первый разряд, во втором справа — второй, в третьем — третий и в крайнем левом — четвертый — высший разряд. Первая верхняя строка соответствует десятичному числу, равному нулю, вторая — единице, третья — двум и последняя (шестнадцатая) — 15. Число кодовых комбинаций в двоичном коде (полном) $N=2^n$, и при $n=4$ $N=16$.

На первой левой позиции в строке обычно записывается наличие или отсутствие в сумме члена 2^{n-1}, на второй — 2^{n-2}, на третьей — 2^{n-3} и т. д. Так, комбинация 6-разрядного двоичного кода ($n=6$) с шестью временными позициями, записанная как 101101 (в виде таблицы), передает число

$$M = 2^5 + 2^3 + 2^2 + 2^0 = 32 + 8 + 4 + 1 = 45.$$

Максимальное число при 6-разрядном двоичном коде

$$M_{max} = 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 63.$$

В виде таблицы такая комбинация записывается как

1 1 1 1 1 1.

Если необходима более высокая точность, то выбирают большее число разрядов n, т. е. семь разрядов двоичного кода и более.

На рис. 3.1 показаны передаваемая непрерывная функция $\lambda(t)$ и запись пронумерованных квантованных ее значений число-импульсным (в центре), двоичным 4-разрядным кодом (табличная запись) и **двоичным кодом с защитой на четность** (справа). В последнем случае если сумма передаваемой комбинации (сумма единиц на четырех позициях строки) равна нечетному числу, то в пятом вертикальном ряду добавляется единица, а если четному, — то нуль. Поэтому сумма единиц всей строки (на пяти позициях) всегда равна четному числу. Если в принимаемой комбинации условие четности не выполняется, то схема защиты запрещает использование этой кодовой комбинации. Такой простейший защищенный код позволяет устранить влияние помех, если число сбоев от помех не превышает одного в кодовой комбинации.

В системах по одному каналу связи передается информация многим или от многих объектов. Кодирование в таких системах применяется для передачи как адреса объекта, так и текста сообщения отдельного объекта (например, значения измеряемого параметра). На приемной стороне

сигнал декодируется, т. е. преобразуется в сообщение для управляемого объекта, индикаторного или иного устройства.

На рис. 3.2 приведена общая схема системы передачи дискретной информации от источника *И* к получателю информации *ПИ* не только на расстояние (в пространстве), но и во времени (запись, хранение и считывание информации). В последнем случае модулятор и демодулятор выполняют функции записи и считывания информации, а линия связи заменяется магнитным или другим носителем информации с целью ее хранения.

Рис. 3.2. Схема передачи информации.

И — источник информации; *К* — кодирующее устройство; *М* — модулятор; *ДМ* — демодулятор; *ДК* — декодирующее устройство; *П* — источник помех; *ПИ* — получатель информации.

В информационных системах часто необходимо обеспечить высокую надежность при передаче команд. Ошибка в передаче может вызвать аварию с большим материальным ущербом и человеческими жертвами. Поэтому в ответственных системах возникновение ложной команды практически не допускается.

Целью кодирования сообщений обычно является:

1) передача по общему каналу связи нескольких или многих сообщений для кодового разделения сигналов;

2) повышение помехоустойчивости и достоверности передачи сообщений;

3) более экономное использование полосы частот канала связи, т. е. уменьшение избыточности;

4) уменьшение стоимости передачи или хранения сообщений;

5) засекречивание передач.

Выбор кода зависит от предъявляемых требований и от возможностей аппаратурной реализации. По назначению коды разделяются на телеграфные, телемеханические, коммерческие, дипломатические, военные, коды цифровых машин и т. д.

Общие проблемы кодирования рассматриваются теорией кодирования, которая развилась в самостоятельную научную дисциплину, использующую специальный математический аппарат.

Коды, применяемые в информационных системах, отличаются определенной спецификой. Отметим следующие особенности таких кодов.

1. Высокая защищенность от возникновения ложных команд, а при использовании ЭВМ также высокая защищенность при передаче других сообщений (ТИ, ТС, ПД и др.). Допустимая вероятность ложной команды в типовых системах телеуправления

$$P_л = 10^{-7} \div 10^{-13}$$

при допустимой вероятности подавления команды, равной примерно нескольким процентам. В специальных случаях предъявляются еще более жесткие требования.

2. Недопустимость большого запаздывания в передаче информации. Во многих случаях допустимое запаздывание меньше минимального интервала между двумя командами или сигналами. Такое требование предъявляется вследствие оперативного использования информации для управления объектами. В связи с этим требованием практически невозможно реализовать статистическое кодирование в одном канале.

3. Сравнительно простая реализация путем использования типовых технических средств и типовых каналов связи. Все процессы кодирования и декодирования должны выполняться автоматически. Классификация характеристик кодов приведена на рис. 3.3.

Для передачи различных символов, составляющих алфавит кода, могут использоваться импульсы с различными признаками, а комбинации импульсов могут передаваться во времени параллельно, последовательно или смешанно. Так, для передачи многих кодов, например с алфавитом $m=2$, могут использоваться как частотные, так и временные избирающие импульсные признаки (рис. 3.4, *а*). Классификация способов передачи элементов кода приведена на рис. 3.4, *б*.

По способу образования кодовых комбинаций коды разделяются на две большие группы: числовые и нечисловые. В числовых (взвешенных) кодах, получивших название цифровых, кодовые комбинации образуют ряд возрастающих по весу чисел, определяемый системой счис-

леиня. Они применяются в первую очередь в системах измерений, контроля, цифровых машинах и т. д., т. е. там, где возникает необходимость в такой закономерности кодовых комбинаций.

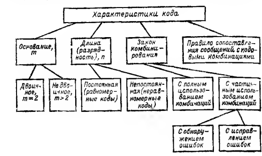


Рис. 3.3. Классификация характеристик кода.

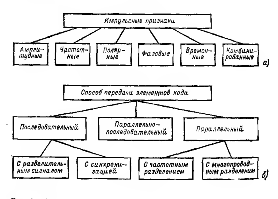


Рис. 3.4. Классификация способов передачи элементов кода.

Нечисловые (невзвешенные) коды не имеют систем счисления и не образуют ряда возрастающих по весу кодовых комбинаций. Нечисловые коды применяются главным образом в системах управления и телеуправления, где команды и сигналы независимы.

3.2. ЦИФРОВЫЕ КОДЫ

В основу правил соответствия кодовых комбинаций числам цифровых кодов положены математические системы счисления, поэтому *коды для передачи возрастающих по весу кодовых комбинаций называются также арифметическими* или взвешенными.

Число различных символов (элементов, знаков в виде букв, набирающих признаков в импульсах и т. п.) в коде m есть основание кода. В рассматриваемых далее простых системах счисления m есть целое число (основание системы счисления — 2, 3, 10 и т. д). Эту величину называют также позиционностью кода. Величина m при передаче чисел связана с системой счисления.

В зависимости от значения m коды называются двоичными ($m=2$), троичными ($m=3$), десятеричными ($m=10$) и т. д.

Для любой натуральной системы счисления любое число N в пределах объема цифрового кода можно записать в виде значений коэффициентов K_i ряда

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} K_i m^i = K_{n-1} m^{n-1} + \ldots + K_1 m^1 + K_0 m^0, \quad (3.2)$$

где n — число разрядов кода; K может изменяться от 0 до $m-1$.

В десятеричной системе ($m=10$)

$$N_{10} = \sum_{i=0}^{n-1} K_i 10^i.$$

Так, число 7204 запишется следующим образом:

$$7204 = 7 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0.$$

В двоичной системе счисления

$$N_2 = \sum_{i=0}^{n-1} K_i 2^i.$$

Так, десятичное число 26 запишется следующим образом:

$$26 = 1\cdot 2^4 + 1\cdot 2^3 + 0\cdot 2^2 + 1\cdot 2^1 + 0\cdot 2^0 = 16 + 8 + 2.$$

Число комбинаций N_{max} в равномерном коде (n=const) будет равно $N = m^n$. Для двоичного кода $N = 2^n$.

На рис. 3.5 приведены зависимости $N = f(n)$ при различном основании m.

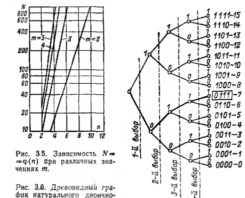


Рис. 3.5. Зависимость $N = \varphi(n)$ при различных значениях m.

Рис. 3.6. Древовидный график натурального двоичного кода ($m=2$, $n=4$).

Двоичная система счисления и двоичные коды получили наиболее широкое применение главным образом из-за сравнительно простой аппаратурной реализации логических операций и арифметических действий, а также устройств для передачи и запоминания сообщений. Например, узкополосные телеграфные каналы связи приспособлены только для передачи дискретных сообщений двухпозиционными кодами.

Преобразование сообщения в сигнал при двухпозиционных кодах производится с помощью простых релейных бесконтактных и контактных элементов, которые могут находиться только в одном из двух состояний: 0 и 1. Устрой-

Таблица 3.1

Код	Десятичные числа									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Двоичный натуральный:										
8-4-2-1	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001
7-4-2-1	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	1000	1001	1010
2-4-2-1	0000	0001	0010	0011	0100	1011	1100	1101	1110	1111
Рефлексный (Грея)	0000	0001	0011	0010	0110	0111	0101	0100	1100	1101

ства с тремя состояниями аппаратурно реализуются значительно сложнее, поэтому коды с основанием $m>2$ применяются значительно реже.

В табл. 3.1 приведены записи кодовых комбинаций десятичных чисел от 0 до 9 для нескольких разновидностей двухпозиционных равномерных кодов с различными весами разрядов.

Графическое представление натурального двоичного кода (древовидный график) для $m=2$ и $n=4$ дано на рис. 3.6. Здесь построение кода по закону

$$N = 2^n$$

рассматривается как n последовательных выборов одного из двух событий (0 или 1). Жирной линией показан выбор кодовой комбинации, соответствующей десятичной цифре 7. Для всех 16 десятичных цифр приведена табличная запись кодовых комбинаций.

Рассмотрим перевод числа из одной системы счисления в другую. Для перевода числа из системы счисления с бо́льшим основанием в систему с меньшим основанием необходимо разделить исходное число на основание системы счисления с меньшим основанием. Полученное частное от деления также разделить на основание этой системы счисления и т. д. до получения в остатке меньше m. Последний остаток и остатки от деления, начиная с последнего остатка, образуют табличную запись числа в другой системе счисления.

Например, для перевода десятичного числа в двоичное необходимо исходное десятичное число разделить на два и записать остаток. Полученное частное от деления разделить на два, записать остаток и т. д. до получения в остатке нуля или единицы. Полученные в конце деления в част-

ном единица и остатки, начиная с последнего, образуют табличную запись исходного числа в двоичной системе.

Так, для перевода десятичного числа 27 в двоичную систему проведем следующие операции:

Делимое	Делитель	Частное	Остаток
27	2	13	1
13	2	6	1
6	2	3	0
3	2	1	1

Результат перевода в табличной записи будет 11011, где первая слева единица есть последний остаток.

Для обратного перевода числа из двоичной записи в десятичную необходимо напротив каждой единицы записать его десятичный эквивалент и суммировать десятичные цифры в строке. Так, для той же табличной записи получим:

$$\begin{matrix} 1 & & 1 & & 0 & & 1 & & 1 & \\ 2^4 & & 2^3 & & 2^2 & & 2^1 & & 2^0 & \\ 16 & + & 8 & + & 0 & + & 2 & + & 1 & =27 \end{matrix}$$

Как отмечалось ранее, перевод числа из одной системы счисления в другую с другими основаниями производится аналогично.

В телеизмерении применяются равномерные коды (n=const) из-за удобства передачи, расшифровки и защиты от ложных кодовых комбинаций. Приемник при этом заранее знает число временных позиций в коде n_p и запрещает прием кодовых комбинаций, если $n \neq n_p$.

Обозначим буквой M максимальное количество сообщений, которое необходимо передать кодовыми комбинациями (упрощенно называемых кодом). В измерении M есть максимальное число уровней квантования. Тогда при выборе кода необходимо выполнить условие

$$M < N.$$

Выбираем число разрядов цифрового кода

$$n = \{\log_m M\}.$$

Здесь фигурные скобки означают округление n до ближайшего целого числа сверху. Так, для максимального числа уравнений квантования $M = 100$ и двоичного кода

$$n = \{\log_2 100\} = 7,$$

при этом $N = 2^7 = 128$; $M = 100$.

Следовательно, условие $M < N$ выполняется. Из всех $N = 128$ комбинаций число разрешенных комбинаций M составляет 100; неиспользуемых комбинаций будет

$$N - M = 28.$$

Для двоичного кода с защитой на четность

$$n_з = n + 1 = \{\log M\} + 1.$$

Здесь фигурные скобки также означают округление до ближайшего целого числа сверху. Так, для $M = 200$ и двоичного кода с защитой на четность (или нечетность)

$$n_з = \{\log 200\} + 1 = 9; \; N = 2^9 = 512.$$

Следовательно, разрешенных комбинаций при этом будет $M = 200$, а запрещенных комбинаций $N - M = 312$.

Избыточность кода принято характеризовать показателем избыточности D, который определяется из выражения

$$D = (n - n_0)/n, \quad (13)$$

где n — число разрядов данного кода; n_0 — число разрядов неизбыточного кода, у которого N такое же, как у данного кода.

Для равномерного неизбыточного цифрового кода

$$N = m^n$$

показатель избыточности $D = 0$. Избыточность двоичного кода с защитой на четность

$$D = (n - n_0)/n = 1/n.$$

Для десятичных чисел во многих случаях используются более сложные коды, основанные на раздельном кодировании каждой из десятичных цифр и поразрядном представлении кодовых комбинаций, соответствующих отдельным десятичным цифрам числа. К таким простейшим кодам относится единично-десятичный код, используемый при наборе номера абонента номеронабирателем в автоматических телефонных системах (АТС). Каждая цифра десятичного числа в этом коде передается соответствующим числом импульсов.

В системах измерений, цифровых и других устройствах широкое применение получил двоично-десятичный код, в котором каждый разряд (цифра) десятичного числа образуется путем кодирования в двоичном коде, при этом цифра десятичного кода (цифры от 0 до 9) образуется, напр-

мер, из четырех разрядов двоичного натурального кода с весами разрядов 8-4-2-1 (см. табл. 3.1 и рис. 3.6). Натуральный двоичный код относнтся к взвешенным кодам, вес разрядов которых уменьшается с переходом от одного разряда к другому в соответствии с выраженнем (3.2) в 2 раза, что упрощает кодирующее устройство.

Например, трехразрядное десятичное число 237, состоящее из трех десятичных цифр в двоично-десятичном коде, представляется следующим образом:

$$237 = 2\cdot 10^2 + 3\cdot 10^1 + 7\cdot 10^0 = (0\cdot 2^3 + 0\cdot 2^2 + 1\cdot 2^1 + 0\cdot 2^0)\,100 + (0\cdot 2^3 + 0\cdot 2^2 + 1\cdot 2^1 + 1\cdot 2^0)\,10 + (0\cdot 2^3 + 1\cdot 2^2 + 1\cdot 2^1 + 1\cdot 2^0)1.$$

В табличной записи это число представляется в виде

0010	0011	0111
Сотни	Десятки	Единицы

Избыточность двоично-десятичного кода зависит от числа разрядов десятичного числа. Для 1-разрядного десятичного числа показатель избыточности $D=0$, так как для образования цифры 9 необходимо четыре двоичных разряда:

$$D = (n - n_0)/n = (4 - 4)/4 = 0.$$

Для максимального 2-разрядного десятичного числа 99 необходимо $n_0=7$ разрядов двоичного кода, а для двоично-десятичного $n=8$ разрядов, т. е.

$$D = (8 - 7)/8 = 1/8 = 0{,}125.$$

Для образования максимального 3-разрядного числа 999 минимально необходимо 10 двоичных разрядов (для $n_0=10$, $N=1024$), при этом показатель избыточности

$$D = (12 - 10)/12 = 0{,}167.$$

Следовательно, избыточность с увеличением числа разрядов в этом коде возрастает. Применение двоично-десятичного кода в измерении продолжает расширяться, так как при сравнительно небольшой избыточности простыми техническими средствами он преобразуется в десятичный код, удобный для восприятия человеком, или в двоичный код, широко используемый в ЭВМ. Поэтому двоично-десятичный код в известной мере является компромиссом между требованиями человека и машины.

Для представления цифр от 0 до 9 в двоично-десятичном коде применяются и другие разновидности двухпозиционного кода с весами 7-4-2-1 и 2-4-2-1 (см. табл. 3.1). Для кода 7-4-2-1 число единиц в табличной записи кодовой комбинации не превышает двух, что позволяет повысить помехоустойчивость передачи.

Кодирование отдельных цифр — частный случай многоступенчатых кодов, в которых кодовая комбинация состоит из нескольких частей. Многоступенчатые коды применя-

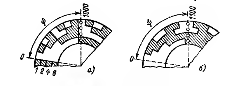


Рис. 3.7. Кодирующий диск с натуральным двоичным кодом (*а*) и с рефлексным кодом Грея (*б*).

ются в телеуправлении и в крупных иерархических системах.

Преобразование угла поворота вала в цифровой код производится с помощью кодирующего диска, в котором считывание достигается опросом разрядов по радиусу для любого значения передаваемой величины.

В натуральном двоичном коде (рис. 3.6 и 3.7, *а*) могут возникать большие погрешности из-за возможного неодновременного изменения цифр в отдельных разрядах двоичного числа во время перехода от одного целого числа к другому (вызванного перекосами и другим несовершенством аппаратуры). Так, при переходе от десятичного числа 7 к десятичному числу 8 необходимо одновременно изменить цифры во всех четырех разрядах двоичного кода. При переходе кодирующего диска от сектора с цифрой 7 к сектору с цифрой 8 на границе этих секторов может происходить неодновременное изменение значений всех четырех разрядов (рис. 3.7, *а*). В результате могут возникать ложные комбинации, отличающиеся от кода цифры 7 на один, два или три знака. Возникающие при этом ошибки достигают 50 %.

Число	Число-импульсный код	Единично-десятичный код		Двоичный натуральный код	Код Грея	Двоично-десятичный код	
0				0000	0000	0000	0000
1	1		1	0001	0001	0000	0001
2	11		11	0010	0011	0000	0010
3	111		111	0011	0010	0000	0011
4	1111		1111	0100	0110	0000	0100
5	11111		11111	0101	0111	0000	0101
6	111111		111111	0110	0101	0000	0110
7	1111111		1111111	0111	0100	0000	0111
8	11111111		11111111	1000	1100	0000	1000
9	111111111		111111111	1001	1101	0000	1001
10		1		1010	1111	0001	0000
11		1	1	1011	1110	0001	0001
12		1	11	1100	1010	0001	0010
13		1	111	1101	1011	0001	0011
14		1	1111	1110	1001	0001	0100
15		1	11111	1111	1000	0001	0101

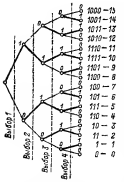


Рис. 3.8. Древовидный график и табличная запись комбинаций кода Грея.

——выбор 0; ━━━выбор 1.

Для устранения этих трудностей Грей предложил использовать разновидность двухпозиционного кода, отличающегося от описаного выше натурального двоичного правилом сопоставления кодовых комбинаций с кодированным числом.

Код Грея не является взвешенным. Из табл. 3,1 и рис. 3.7, *б* и 3.8 следует, что в коде Грея переход от любой цифры к ближайшей другой всегда вызывает изменение цифры только в одном разряде. Это позволяет устранить указанные выше ошибки преобразования угла поворота в кодовую комбинацию. Преобразование кода Грея в нормальный двоичный рассмотрено в гл. 9.

Код Грея и другие коды с такими же свойствами получили название *рефлексных ко-*

дов и широко применяются в преобразователях угол поворота — код или линейное перемещение — код.

В табл. 3.2 приведены записи различными кодами чисел от 0 до 15.

Для примера определим ширину спектра сигнала в многоканальной кодо-импульсной системе измерений с амплитудной модуляцией (КИМ — АМ), если задано: число каналов $N=10$; время цикла $T_ц=0{,}1$ с; несущая частота $f_0=10\,000$ Гц; код двоичный, 7-разрядный, неизбыточный ($n_0=7$) со скважностью импульсов

$$Q=(\tau_и+\tau_п)/\tau_и=2,$$

где $\tau_и$ — длительность импульсов; $\tau_п$ — длительность паузы между ближайшими соседними импульсами.

Определим следующие параметры:

1) канальное время (в течение цикла)

$$T_к=T_ц/N=0{,}1/10=0{,}01 \text{ с};$$

2) длительность элементарного импульса (на 1 разряд)

$$\tau_и=T_к/n_0Q=0{,}01/7\cdot 2=0{,}00071 \text{ с}=0{,}71 \text{ мс};$$

3) ширина спектра КИМ — АМ по (1.17):

$$\Delta f=2/\tau_и=2\cdot 10^3/0{,}71=2800 \text{ Гц}.$$

3.3. НЕЦИФРОВЫЕ КОДЫ

Нецифровые коды применяются для передачи независимых команд, когда нет необходимости во взвешенных кодах. Используются как двухпозиционные, так и многопозиционные коды.

В последнее время наблюдается все меньшее разделение кодов на коды телеуправления, телеизмерения и другие в связи с повышением требований к достоверности передачи всех сигналов (для систем с ЭВМ) и переход к унифицированным, в основном цифровым кодам.

В основу принципов комбинирования нецифровых кодов положены законы математической теории соединений. Используются перестановки P_n, размещения A_m^m, сочетания C_m^m и другие законы комбинирования.

Для кода, в основу которого положены перестановки символов (букв, цифр, избирающих признаков и т. п.), длина кодовой комбинации (длина кода)

$$n=m=\text{const}.$$

Полиое число перестаиовок

$$N = P_n = \prod_{i=1}^{n} i = 1 \cdot 2 \cdot 3 \ ... \ n = n! \qquad (3.4)$$

Так, для трех символов ($n=m=3$) будет всего шесть перестаиовок: «абв», «авб», «бав», «бва», «ваб», «вба», при этом

$$N = P_3 = \prod_{i=1}^{3} i = 1 \cdot 2 \cdot 3 = 6.$$

С увеличением n число перестаиовок быстро возрастает. Так, $P_4=24$, $P_5=120$, $P_6=720$, $P_7=5040$.

Одиократиое использоваиие каждого символа (буквы, цифры) в любой кодовой комбинации P_n и условие $n = \text{const}$ позволяют обиаруживать одиночные ошибки иа приемной стороие Следовательио, код P_n обладает свойством обнаружения одиночных ошибок. Например, переход «авб» или «бва» к любой кодовой комбииации приведет к образоваиию не используемых в коде комбинаций с двумя «б», с двумя «в» и т.д., которые могут быть автоматически обиаружены иа приемиой стороие и вызовут защитиый отказ в приеме даииой комбинации.

Для кода, в осиову которого положеиы размещеиия,

$$A_{m_0}^m,$$

где m_0 — полное число отличающихся друг от друга символов в коде (число букв в алфавите), каждая кодовая комбииация имеет $n=m$ различных символов (букв, цифр, качественных признаков и т.п.) из m_0 возможиых ($m_0 > m = n$).

Для кода $A_{m_0}^m$ число комбинаций

$$N_A = A_{m_0}^m = m_0 (m_0 - 1)(m_0 - 2) \dots (m_0 - m + 1) = = m_0!/(m_0 - m)!. \qquad (3.5)$$

Для применяемого в телеуправлении кода на размещение из m_0 частот по две ($m=2$)

$$A_{m_0}^2 = m_0!/(m_0 - 2)! = m_0 (m_0 - 1). \qquad (3.6)$$

Так, для $m_0=10$ и $m=2$

$$N_A = A_{10}^2 = 10 (10 - 1) = 90.$$

Кодовая комбинация для алфавита, передаваемого различными частотами, образуется путем последовательной посылки колебаний двух частот из m_0 возможных (рис. 3.9).

Код на размещение позволяет обнаруживать любые одиночные ошибки, например, путем счета символов (импульсов), принимаемых одновременно на всех частотах. Если при передаче принята сначала одна частота, а затем вторая, то эта комбинация разрешенная. Запрещены все

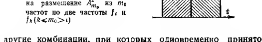


Рис 3.9 Комбинации кода на размещение $A^2_{m_0}$ из m_0 частот по две частоты f_i и f_k ($k < m_0 > i$)

другие комбинации, при которых одновременно принято другое число частот.

Коды на сочетания

$$C^m_{m_0},$$

где m_0 — общее число различающихся друг от друга символов (число букв в алфавите); m — число символов в каждом сочетании, отличаются от кодов на размещения отсутствием комбинаций, различающихся только порядком следования символов.

Равномерный двухпозиционный код на все сочетания от $m=0$ до $m=m_0$ называется полным. Число комбинаций полного кода

$$N_c = \sum_{m=0}^{m_0} C^m_{m_0} = 2^{m_0} = 2^n.$$

Для m_0=const и m=const число комбинаций на одно сочетание

$$N_c = C^m_{m_0} = \frac{m_0 (m_0 - 1) \ \ldots \ (m_0 - m + 1)}{1 \cdot 2 \ \ldots \ m} = \frac{A^m_{m_0}}{P_m} = = \frac{m_0!}{m! \, (m_0 - m)!} \,. \tag{3.7}$$

Следовательно, число комбинаций на одно сочетание N_c (3.7) при m=const в $m!$ раз меньше числа размещений N_A (3.6):

$$N_c = N_A / m!,$$

Код	C_4^1	C_4^2	C_4^3	C_4^4
Число комбинаций кода N_c	4	6	4	1
Комбинации кода	a_1; a_2; a_3; a	$a_1 a_2$; $a_1 a_3$; $a_1 a_4$; $a_2 a_3$; $a_2 a_4$; $a_3 a_4$	$a_1 a_2 a_3$; $a_1 a_2 a_4$; $a_1 a_3 a_4$; $a_2 a_3 a_4$	$a_1 a_2 a_3 a_4$

Рис. 3.10. Примеры кодовых комбинаций с временным разделением на одно сочетание из $m_0=8$ временных позиций по два импульса (C_8^2).

В табл. 3.3 приведены N_c и комбинации кодов $C_{m_0}^m$ для $m_0=4$.

Например, возможен код на сочетание

$$C_{m_0}^2$$

с временным разделением элементов сигнала (рис. 3.10), при этом число комбинаций

$$N = C_{m_0}^2 = m_0(m_0-1)/2. \tag{3.8}$$

Для примера определим избыточность кода с временным разделением элементов сигнала на сочетание

$$C_{m_0}^2,$$

если необходимо передать 30 сообщений ($M=30$). Для кода с временным разделением элементов сигнала (с временными избирающими признаками) m_0 есть длина кодовой комбинации ($m_0=n$), т. е. длина кода (рис. 3.10). При небольших значениях m_0 длину кода можно найти путем подбора. Так, для $m_0=8$, $m_0=9$ и $m_0=10$ соответственно получаем:

$$C_8^2 = 8 \cdot 7/2 = 28; \quad C_9^2 = 9 \cdot 8/2 = 36; \quad C_{10}^2 = 10 \cdot 9/2 = 45.$$

Для заданного $M=30$ и $M<N$ выбираем $m_0=9=n$. При неизбыточном двоичном коде для передачи $M=30$ сообщений минимальная длина неизбыточного кода $n_0=5$ ($N=2^n=2^5=32$). Отсюда по (3.3) коэффициент избыточности кода

$$D=(n-n_0)/n=(9-5)/9=0{,}44=44\,\%.$$

Двухпозиционный последовательный код на сочетание $C^1_{m_0}$ получил название распределительного и широко применяется в устройствах с временным разделением сигналов для передачи одной из m_0 команд за один цикл:

$$N=C^1_{m_0}=m_0.$$

Такой код имеет высокую помехоустойчивость. Коды на одно сочетание имеют постоянное число единиц и поэтому могут обнаруживать одно искажение вида $1\to0$ или $0\to1$, например, путем счета единиц (импульсов, а для временных кодов — и пауз) в кодовой комбинации. Это относится к кодам как с частотными, так и с временными признаками.

Одной из разновидностей кодов на соединение является сменно-качественный (СК) код.

В СК-коде размещаемые без интервалов соседние символы не могут быть одинаковыми. Такие комбинации, как, например, «аббс», «ссва» и т. п., запрещены. Избирающими признаками при реализации СК-кода обычно служат частоты.

Полное число кодовых комбинаций в СК-коде при числе букв в алфавите m и длине комбинаций n

$$N=m\,(m-1)^{n-1}. \tag{3.9}$$

Число символов в СК-коде $m\geqslant3$, т. е. СК-код не относится к двухпозиционным кодам.

3.4. КОДЫ С ОБНАРУЖЕНИЕМ И ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК

Если в коде используются не все возможные комбинации

$$M<N$$

и помеха может искажать отдельные символы (передаваемые импульсы), то на приемной стороне появляется возможность обнаруживать, а при определенной избыточно-

сти исправлять ошибочно переданные кодовые комбинации. Достоверность передачи при этом повышается. Такие коды получили название помехоустойчивых или корректирующих.

Подавляющее большинство устройств телеуправления использует коды с обнаружением ошибок при передаче команд телеуправления, автоматический отказ в приеме запрещенных комбинаций и запрос повторения. Такие коды широко применяются для передачи сигналов ТИ и ТС в связи с повышением требований к достоверности передачи, вызванным применением цифропечатающих, вычислительных и управляющих машин, допускающих вероятность ошибки $P<10^{-6}$.

В тех случаях, когда сообщения передаются только в одном направлении и нет обратного канала, более широко применяются коды с исправлением ошибок, требующие большей избыточности и более сложной аппаратуры.

Ограничимся рассмотрением двухпозиционных кодов ($m=2$) и будем учитывать только дискретные искажения, при которых единица переходит в нуль ($1\to0$) или нуль переходит в единицу ($0\to1$). Переход $1\to0$ или $0\to1$ только в одном элементе кодовой комбинации условимся называть единичной ошибкой (единичным искажением) и обозначим ее

$$\Delta=1.$$

Возможны двукратные ($\Delta=2$) и многократные ($\Delta>2$) искажения элементов кодовой комбинации в пределах $0\leqslant\Delta\leqslant n$.

К корректирующим относится широко применяемая группа кодов, получившая название систематических, у которых каждая кодовая комбинация состоит из n_0 информационных элементов неизбыточного (неизбыточного) кода и k проверочных (корректирующих) элементов, добавляемых с целью обнаружения и исправления ошибок.

Систематические коды относятся к разделимым кодам, у которых информационные и контрольные элементы могут быть разделены. Общее число элементов в кодовой комбинации

$$n=n_0+k. \tag{3.10}$$

Простейшим примером кода, только обнаруживающего единичные ошибки, но не исправляющего их, является двоичный код с проверкой на четность, также называемый ко-

дом с контролем по паритету. К n_0 информационным элементам двоичного неизбыточного кода добавляется один проверочный элемент, так что общее число элементов в коде с проверкой на четность

$$n = n_0 + 1.$$

Если данная кодовая комбинация содержит четное число единиц в информационной части, то добавляется проверочный элемент 0. Для кодовых комбинаций с нечетным

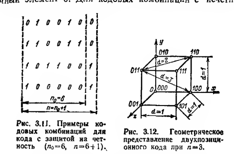


Рис. 3.11. Примеры кодовых комбинаций для кода с защитой на четность ($n_0=6$, $n=6+1$).

Рис. 3.12. Геометрическое представление двухпозиционного кода при $n=3$.

числом информационных единиц проверочный элемент, размещаемый в конце кодовой комбинации, будет 1 (рис. 3.11).

На приемной стороне декодирующее устройство контролирует четность информационных единиц обычно с помощью триггера со счетным входом и схемы совпадений. Если принятый проверочный элемент является нулем, а число принятых информационных единиц четное, то это разрешенная комбинация, и сигнал поступает на выход декодирующего устройства. Разрешенной комбинацией является и нечетное число информационных единиц, но с проверочным элементом единицей. При этом сигнал также поступает на выход декодирующего устройства. Во всех других случаях проверочное устройство вырабатывает защитный отказ и запрещает прием кодовой комбинации, т. е. комбинации относятся к запрещенным. Легко убедиться, что при этом осуществляется защита от любых единичных ошибок в кодовой комбинации ($\Delta=1$).

Первые работы по систематическим кодам принадлежат Хеммингу, который ввел понятие о *кодовом расстоянии* и предложил код с автоматическим исправлением единичной ошибки в кодовой комбинации. К n_0 информационным элементам в коде Хемминга добавляется k проверочных элементов для автоматического определения местоположения ошибочного элемента в результате k проверок на четность. Этот код будет рассмотрен далее.

Для наглядного анализа корректирующих свойств кодов Хемминг предложил **геометрическое представление кодов в виде n-мерного куба**, где n — число разрядов двухпозиционного кода. Длина каждого ребра такого куба $d=1$ и соответствует единичному переходу $0\to1$ или $1\to0$ в соответствующем разряде (элементе) кода. Вершины n-мерного куба отображают кодовые комбинации, а их координаты — значения соответствующих символов. На рис. 3.12 изображен такой трехмерный куб ($n=3$) с длиной каждого ребра $d=1$. Рядом с вершинами записаны соответствующие им 3-разрядные двоичные числа в виде табличных записей.

Эта геометрическая модель кода наглядно иллюстрирует, что ближайшие кодовые комбинации 000 и 010, 000 и 100, 111 и 110 и другие отстоят одна от другой на длину одного ребра n-мерного куба ($d=1$), что соответствует переходу $0\to1$ или $1\to0$.

Все другие кодовые комбинации, за исключением ближайших, расположены одна от другой на расстоянии $d>1$, равном числу ребер, соединяющих данные вершины n-мерного куба кратчайшим путем. Наиболее удаленные вершины n-мерного куба находятся на расстоянии $d_{max}=n$ единичных переходов (n ребер). Так, для трехмерного куба (рис. 3.12) максимальное расстояние $d_{max}=3$ будет между вершинами 000 и 111; 001 и 110; 011 и 100.

Для повышения устойчивости кода к импульсным помехам, которые могут вызвать единичные ошибки ($\Delta=1$), целесообразно выбирать рабочие комбинации кода, отстоящие одна от другой на большие расстояния ($\Delta=2$ и более). Это достигается ценой повышения избыточности кода. Если $d\geqslant2$, то единичные ошибки не будут переводить одну рабочую комбинацию в другую и ложные сигналы для единичных искажений будут исключены. Единичные ошибки будут вызывать на приемной стороне защитный отказ.

В § 3.3 указывалось на возможность обнаружения ошибок в кодах на сочетания $C_{m_0}^m$ при $m=\text{const}$, в кодах на перестановки P_n, в сменно-качественных кодах и в кодах на размещения $A_{m_0}^m$ при $m=\text{const}$.

Связь между кодовым расстоянием и возможностью обнаруживать и исправлять ошибки в коде определяется следующей зависимостью:

$$d_{min} = r + s + 1 \text{ при } r \geqslant s, \tag{3.11}$$

где d_{min} — минимальное кодовое расстояние; r — число ошибок, которые обнаруживаются в кодовой комбинации; s — число ошибок, исправляемых в кодовой комбинации.

Так, при $r=1$ и $s=0$ минимальное кодовое расстояние $d_{min}=2$, что соответствует, например, коду с защитой на четность (или нечетность).

В неизбыточном цифровом коде $D=0$, а минимальное кодовое расстояние $d_{min}=1$. Такой код не обнаруживает и не исправляет ошибок. Если ошибки только исправляются, то выбирают $r=s$.

Так, для кода с исправлением одной ошибки $s=1$, $r=1$,

$$d_{min} = 2s + 1 = 3.$$

Если необходимо обнаруживать две и исправлять одиночную ошибку, $r=2$, $s=1$ (r всегда больше s),

$$d_{min} = 2 + 1 + 1 = 4.$$

К сравнительно простым кодам, обнаруживающим единичную ошибку, как отмечалось ранее, относится код с постоянным числом единиц на сочетание

$$N = C_{m_0}^m.$$

Такой код с $m_0=5$ и $m=2$ при временно́м разделении элементов применяется для поразрядного кодирования десятичных чисел от 0 до 9 (аналогично поразрядному кодированию десятичных чисел в двоично-десятичном коде).

Согласно (3.8)

$$N = C_5^2 = m_0(m_0 - 1)/2 = 5 \cdot 4/2 = 10.$$

Записи кода для чисел от 0 до 9 приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Десятичное число	Код C_5^2	Десятичное число	Код C_5^2
1	00011	6	01100
2	00101	7	10001
3	00110	8	10010
4	01001	9	10100
5	01010	10	11000

Кодовое расстояние d между двумя кодовыми комбинациями определяется *сложением по модулю 2* единиц в табличных записях кода. Операция производится без переноса единицы в старший разряд и обозначается $\oplus$.

При сложении по модулю два получим:

$$1 \oplus 1 = 0; \quad 1 \oplus 0 = 1;$$
$$0 \oplus 0 = 0; \quad 0 \oplus 1 = 1.$$

Так, из табл. 3.4 кодовое расстояние между комбинациями для соседних десятичных чисел 1 и 2 $d=2$ (две единицы в сумме по модулю 2):

$$\begin{array}{r} 00011 \\ \oplus \\ 00101 \\ \hline 00110 \end{array}$$

Кодовое расстояние между десятичными числами 1 и 6 в табл. 3.4 будет равно четырем, так как

$$\begin{array}{r} 00011 \\ \oplus \\ 01100 \\ \hline 01111 \end{array}$$

Легко убедиться, что минимальное кодовое расстояние в кодовых комбинациях этой таблицы $d_{min}=2$, а следовательно, этот код обнаруживает все единичные ошибки. С учетом всех возможных искажений его защищенность от помех несколько выше, чем защищенность кода с защитой на четность.

Код Хемминга. Перейдем к рассмотрению систематического кода Хемминга с автоматическим исправлением ошибок. Общее число символов (элементов) в кодовой комбинации

$$n = n_0 + k,$$

где n_0 — число информационных элементов, образующих последовательность двоичных чисел; k — число проверочных (контрольных) элементов, которые вводятся так, чтобы в табличной записи кодовой комбинации в результате определенного ряда проверок в данной строке на четность (суммирование по модулю 2) можно было определить место и исправить искаженный элемент в строке принятой комбинация кода. Проверки на четность производятся в соответствии с закономерностями построения таблицы двоичных чисел и в результат записывается 0 при отсутствии ошибок или 1 при обнаружении ошибок, т. е. в виде двоичного числа. Всего производится k проверок по числу контрольных элементов и записывается k-разрядное двоичное число, которое определяет номер позиции кода с ошибкой.

Первая проверка включает в себя позиции кода, соответствующие табличной записи двоичных чисел натурального двоичного кода (см. табл. 3.2)

0001, 0011, 0101, 0111, 1001.

Это соответствует нечетным десятичным числам 1, 3, 5... (правый столбец в табл. 3.2). Вторая проверка выясняет искажения элементов кода на позициях по табличной записи

0010, 0011, 0110, 0111, 1010,

что соответствует второму столбцу в табл. 3.2 и десятичным числам 2, 3, 6, 7, 10, 11 и т. д.

Число контрольных (проверочных) символов k определяет число проверочных уравнений.

В качестве примера рассмотрим семиэлементный код Хемминга: $n=7$, $n_0=4$, $k=3$. Из табл. 3.6 (см. далее) следует, что для $n_0=4$ и $k=3$ местоположение ошибки определяется однозначно. Так, если ошибок нет, то при всех трех проверках будет получен 0. Одновременное изменение знака при проверках 1 и 2 соответствует ошибке на позиции 3 кода, т. е. соответственно для третьей комбинации в табл. 3.2. Изменение знака при проверках 1 и 3 соответствует ошибке на позиции 5 кода, изменение знака при проверках 2 и 3 — на позиции 6 кода, а изменение знака при всех трех проверках — на позиции 7 кода. Эти изменения соответствуют двоичной записи десятичных чисел.

Информационные и контрольные элементы кодовой комбинации, обозначаемые соответственно $И_i$ и K_j (табл. 3.5), необходимо размещать на определенных местах для на-

Таблица 3.5

Номер сообщения	Табличная запись 7-элементного кода ($n_c=4$, $k=3$)							Дополнительная позиция 8
	1	2	3	4	5	6	7	
	K_1	K_2	$И_4$	K_3	$И_3$	$И_2$	$И_1$	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	1	0
2	0	1	0	1	0	1	0	1
3	1	0	0	0	0	1	1	1
4	1	0	0	1	1	0	0	1
5	0	1	0	0	1	0	1	1
6	1	1	0	0	1	1	0	0
7	0	0	0	1	1	1	1	0
8	1	1	1	0	0	0	0	1
9	0	0	1	1	0	0	1	1
10	1	0	1	1	0	1	0	0
11	0	1	1	0	0	1	1	0
12	0	1	1	1	1	0	0	0
13	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	1	0	1	1	0	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1

хождения местоположения ошибок, а выбор мест может быть различным.

Контрольные элементы принято размещать на позициях кода $2^0, 2^1, 2^2 \dots 2^{k-1}$, т. е. на позициях 1, 2, 4, 8, 16..., на которых в табличной записи двоичных чисел (см. табл. 3.2) есть только одна единица (для удобства обнаружения места ошибки по таблице двоичных чисел), при этом контрольные элементы записываются на позициях кода, начиная с крайней левой — первой позиции. Младший информационный разряд двоичного числа, соответствующий 2^0, записывается на правой позиции, следующий информационный разряд 2^1 записывается левее и т. д. в соответствии с табл. 3.5.

В этой таблице дан пример кодовых комбинаций рассматриваемого 7-элементного кода Хемминга для 15 сообщений (команд). Информационные элементы размещены на позициях кода 3, 5, 6 и 7, а контрольные (проверочные) — на позициях 1, 2 и 4.

Дополнительная позиция 8 введена для проверки на общую четность, поэтому кодовое расстояние $d_{min}=3+$ $+1=4$.

В коде Хемминга (табл. 3.5) на каждой горизонтальной строке размещено четыре единицы (за исключением цифры 15), что позволяет увеличить защищенность кода путем счета единиц в каждой кодовой комбинации и отказа в передаче кодовой комбинации, если число единиц отлично от четырех или не кратно четырем.

Определение местоположения ошибки состоит из следующих операций. Допустим, что принята искаженная комбинация кода Хемминга

0111000,

отсутствующая в табл. 3.5 (без учета позиции 8 кода). Проверим на четность соответствующие разряды кодовой комбинации. При первой проверке в соответствии с табл. 3.5 суммируются единицы по модулю 2 на позициях кода 1, 3, 5 и 7. В проверяемой строке 0111000 такое суммирование дает 1, которая и записывается на позиции 1 кода. Вторая проверка охватывает позиции 2, 3, 6 и 7.

В результате суммирования получаем 0, который записывается на второй позиции кода. При проверке 3 на позициях кода 4, 5, 6 и 7 получаем нечетное число единиц, а следовательно, в третьем разряде записывается 1 и т. д. В результате получили проверочное число в двоичной записи 101, которое соответствует десятичному числу 5, указывающему на искажение элемента кода на пятой позиции. При изменении на этой позиции (в принятой комбинации) 0 на 1 восстанавливается кодовая комбинация

0111100,

что соответствует переданному десятичному числу 12. В реальных системах исправление ошибки производится на приемной стороне автоматически. Введение в коде Хемминга дополнительной позиции 8 для проверки на четность и счет единиц в строке увеличивают кодовое расстояние

$$d_{min} = 2 + s + 1 = 2 + 1 + 1 = 4$$

и позволяют исправлять одну ($s=1$) и обнаруживать две ($r=2$) ошибки.

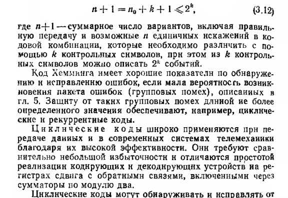
Избыточность кода

$$D = (n - n_0)/n = (8 - 4)/8 = 50\%.$$

Выбор числа контрольных элементов k в коде Хемминга при заданном числе информационных элементов n_0 про-

Таблица 3.6

n_0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
k	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5



изводится по табл. 3.6, которая получена из неравенства

$$n+1=n_0+k+1 \leqslant 2^k, \qquad (3.12)$$

где $n+1$ — суммарное число вариантов, включая правильную передачу и возможные n единичных искажений в кодовой комбинации, которые необходимо различить с помощью k контрольных символов, при этом из k контрольных символов можно описать 2^k событий.

Код Хемминга имеет хорошие показатели по обнаружению и исправлению ошибок, если мала вероятность возникновения пакета ошибок (групповых помех), описанных в гл. 5. Защиту от таких групповых помех длиной не более определенного значения обеспечивают, например, циклические и рекуррентные коды.

Циклические коды широко применяются при передаче данных и в современных системах телемеханики благодаря их высокой эффективности. Они требуют сравнительно небольшой избыточности и отличаются простотой реализации кодирующих и декодирующих устройств на регистрах сдвига с обратными связями, включенными через сумматоры по модулю два.

Циклические коды могут обнаруживать и исправлять от одной до нескольких ошибок в кодовой комбинации в зависимости от выбранной избыточности. Они, так же как и код Хемминга, относятся к блочным, систематическим кодам, у которых каждая кодовая комбинация кодируется и декодируется отдельно (блочные коды) и состоит из n_0 информационных и $k=n-n_0$ проверочных (контрольных) символов, размещенных на определенных позициях (систематические коды). Выбирается $n=\text{const}$ и $n_0=\text{const}$, т. е. это равномерные коды. Основные показатели кода n и n_0 принято писать в скобках, т. е. (n, n_0). Так, код (7.4) имеет $n=7$ и $n_0=4$.

Теория циклических кодов базируется на математической теории групп, алгебре многочленов и теории колец.

Ограничимся рассмотрением двухпозиционных кодов ($m=2$), у которых элементы кодовых комбинаций могут быть 0 или 1.

Совокупность кодовых комбинаций циклического (n, n_0) кода может быть записана в виде матрицы, имеющей n символов в строке; в матрице n_0 строк линейно-независимы.

Эти n_0 линейно-независимых строк n-разрядных кодовых комбинаций могут рассматриваться как образующая матрица, у которой строки связаны условием цикличности.

Все строки образующей матрицы циклического кода могут быть получены циклическим сдвигом одной кодовой комбинации, называемой образующей для данного кода. Сдвиг осуществляется справа налево, при этом крайний левый символ при образовании последующей комбинации переносится на крайнее правое место и т. д.

Например, матрица для кодовых комбинаций, образуемых циклическим сдвигом комбинации 0001011, будет иметь вид:

$$\left\|\begin{matrix} 0&0&0&1&0&1&1 \\ 0&0&1&0&1&1&0 \\ 0&1&0&1&1&0&0 \\ 1&0&1&1&0&0&0 \\ 0&1&1&0&0&0&1 \\ 1&1&0&0&0&1&0 \\ 1&0&0&0&1&0&1 \end{matrix}\right\|.$$

В соответствии с теорией циклических кодов n-разрядная кодовая комбинация представляется в виде многочлена (полинома) с фиктивной переменной x. Наименьшему разряду, располагаемому в многочлене справа, соответствует фиктивная переменная $x^0=1$. Номера разрядов многочлена, начиная с нулевого, соответствуют показателям степени x, а коэффициент при x для рассматриваемых двухпозиционных кодов равен 0 или 1. n-разрядный многочлен с коэффициентами при x, равными единице, будет иметь вид:

$$S(x) = 1\cdot x^{n-1} + 1\cdot x^{n-2} + \dots + 1\cdot x^2 + 1\cdot x + 1\cdot x^0.$$

Коэффициенты многочлена принято не писать, а члены с коэффициентами 0 опускать. Так для 5-разрядной ($n=5$) кодовой комбинации 01011 многочлен будет иметь вид:

$$S(x) = x^3 + x + 1.$$

В любом многочлене *наибольшая степень x с коэффициентом 1 называется степенью многочлена*, поэтому данный многочлен третьей степени.

Представление кодовых комбинаций в виде многочленов позволяет сводить действия над кодовыми комбинациями к математическим действиям над многочленами по определенным правилам (в данном поле) двоичных чисел [22].

Рассмотрим правила действия над многочленами.

Сложение и вычитание многочленов равносильны и производятся по модулю 2, обозначаемому $\oplus$. При этом суммируются только члены с одинаковой степенью x без переноса единицы в более старший разряд по следующим правилам:

$$0 \oplus 0 = 0; \quad 0 \oplus 1 = 1; \quad 1 \oplus 0 = 1; \quad 1 \oplus 1 = 0.$$

Если суммируется несколько чисел, то четное число единиц в сумме дает нуль. Для примера сложим три многочлена и соответствующие им комбинации 8-разрядного кода ($n = 8$):

$$x^7 + x^5 + x^3 + x^2 + 1 \to 10101101;$$
$$x^5 + x + 1 \to 00100011;$$
$$x^7 + x^6 + x^5 + x + 1 \to 11100011.$$

При суммировании многочлены расположим таким образом, чтобы члены с одинаковыми степенями находились друг под другом (столбцы), при этом справа будут суммироваться кодовые комбинации, соответствующие многочленам:

$$\begin{array}{l}
\ x^7 + 0 + x^5 + 0 + x^3 + x^2 + 0 + 1 \to 10101101 \\
\oplus \hspace{16em} \oplus \\
\ 0 + 0 + x^5 + 0 + 0 + 0 + x + 1 \to 00100011 \\
\oplus \hspace{16em} \oplus \\
\ \underline{x^7 + x^6 + x^5 + 0 + 0 + 0 + x + 1} \to \underline{11100011} \\
\ 0 \quad + x^6 + x^5 + 0 + x^3 + x^2 + 0 + 1 \to 01101101
\end{array}.$$

Умножение многочлена на x повышает степень каждого члена на 1, умножение на x^2 повышает степень каждого члена многочлена на 2, а умножение на x^n — на n. Это соответствует для кодовых комбинаций передвижению их в регистре сдвига соответственно на одну, две или n ячеек. Следовательно, умножение на x^i соответствует приписыванию справа i нулей или передвижению кодовых комбинаций в регистре на i ячеек и не требует какой-либо до-

полнительной аппаратуры. Например, умножение приведенного выше многочлена на x^3, т. е.

$$(x^3+x+1)x^3=x^6+x^4+x^3 \rightarrow 1011000,$$

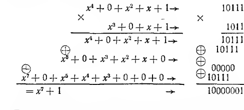
соответствует добавлению в кодовой комбинации трех нулей справа.

Умножение одного многочлена на другой состоит из двух этапов:

1) умножения одного многочлена на другой по правилам обычной алгебры, за исключением входящих в умножение операций сложения;

2) операции сложения по модулю 2.

Например, перемножим многочлены и соответствующие им кодовые комбинации, располагая члены с одинаковыми степенями друг под другом, в столбцы:



$$\begin{array}{rl} x^4+0+x^2+x+1 \rightarrow & 10111 \\ \times\quad x^3+0+x+1 \rightarrow & \times\ 1011 \\ \hline x^4+0+x^2+x+1 \rightarrow & 10111 \\ \oplus\ x^5+0+x^3+x^2+x+0 \rightarrow & \oplus\ 10111 \\ & \oplus\ 00000 \\ \oplus\ x^7+0+x^5+x^4+x^3+0+0+0 \rightarrow & \oplus\ 10111 \\ \hline =x^7+1 \qquad \rightarrow & 10000001 \end{array}$$

Для циклических кодов приведенные правила умножения выполняются, если суммарная степень полученного многочлена, которая определяется заданным n-разрядным кодом (а соответственно для регистра сдвига — числом n ячеек регистра, замкнутых в кольцо) не превышает $n-1$.

В отличие от изложенных правил умножения для циклических кодов производится *символическое умножение* в конечном поле двоичных чисел без увеличения максимальной $(n-1)$-й степени многочлена.

В приведенной выше матрице циклический сдвиг строки с единицей в старшем разряде производится с переносом единицы из старшего разряда в младший. Это соответствует умножению многочлена степени $n-1$ на x с одновременным вычитанием из результата умножения $x^n+1=$ $=x^n-1$, т. е. с приведением многочлена по модулю x^n+1. А для регистра сдвига, замкнутого в кольцо, это соответст-

вует переносу единицы из старшего разряда ячейки в младший с одновременным сдвигом остальной части кодовой комбинации на одну ячейку.

Деление одного многочлена на другой производится по правилам обычной алгебры, за исключением входящих в деление операций вычитания, которые здесь равносильны сложению и производятся по модулю 2. Деление многочлена на многочлен производится до тех пор, пока степень остатка станет меньше степени делителя, что соответствует числу разрядов остатка, меньшему числа разрядов делителя. Например, разделим два многочлена и соответствующие им кодовые комбинации:

$$\begin{array}{l} x^7+x^6+x^5+x^4+0+x^2+x+1 \;\big|\; x^3+x+1 \\ \oplus\; x^7+0+x^5+x^4 \qquad\qquad\qquad\quad x^4+x^3+x+1 \\ \qquad x^6+0+0+0 \\ \quad\oplus\; x^6+0+x^4+x^3 \\ \qquad\qquad x^4+x^3+x^2+x \\ \qquad\oplus\; x^4+0+x^2+x \\ \qquad\qquad\quad x^3+0+0+1 \\ \qquad\quad\oplus\; x^3+0+x+1 \\ \text{Остаток} \rightarrow \qquad\qquad x+0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \rightarrow 11110111 \;|\; 1011 \\ \oplus\; 1011 \qquad\quad 11011 \\ \quad 1000 \\ \oplus\; 1011 \\ \quad 1111 \\ \oplus\; 1011 \\ \quad 1001 \\ \quad 1011 \\ \text{Остаток} \rightarrow \quad 10 \end{array}$$

Таким образом, были рассмотрены операции сложения, умножения и деления многочленов, на которых основаны

принципы кодирования и декодирования циклических кодов.

Среди множества многочленов существуют неприводимые, которые не могут быть представлены в виде произведения многочленов низших степеней. Они аналогичны простым числам в теории чисел, которые делятся без остатка только на себя и на единицу.

В циклических кодах любой разрешенный многочлен делится без остатка на образующий, в качестве которого выбирается неприводимый многочлен. Все другие многочлены, соответствующие запрещенным кодовым комбинациям, не делятся без остатка на образующий многочлен, что позволяет по остатку обнаруживать и исправлять ошибки. Вектор ошибки определяется по остатку при делении на образующий многочлен. Следовательно, любая разрешенная кодовая комбинация может быть получена путем умножения образующего многочлена на другой многочлен с приведением результата по модулю x^n+1 (из-за цикличности построения кода, как отмечалось ранее). При этом в качестве образующего (генераторного или производящего) многочлена выбирается неприводимый многочлен.

В табл. 3.7 сведены все неприводимые многочлены до пятой степени и выборочно неприводимые многочлены до девятой степени, а также их эквиваленты в виде простых чисел. Многочлены табл. 3.7 используются для выбора образующего полинома.

При построении циклического кода, если выбрать n_0-разрядный многочлен сообщения $S_{\text{и}}(x)$, соответствующий n_0-разрядной информационной кодовой комбинации неизбыточного двухпозиционного кода, и умножить его на образующий (выбираемый неприводимый) многочлен $P(x)$, то уже получим циклический код. Однако такой код не будет систематическим, так как его контрольные K-символы будут размещаться на трудно определяемых местах результирующей кодовой комбинации, а это затрудняет декодирование.

В практически реализуемых схемах декодирование резко упрощается, если контрольные символы разместить в конце строки после информационных. Для такого формирования искомого многочлена циклического кода $F(x)$ производят следующие преобразования и операции:

1) заданный многочлен сообщения $S_{\text{и}}(x)$, соответствующий n_0-разрядной информационной кодовой комбинации неизбыточного двухпозиционного кода, умножают на x^k,

Таблица 3.7

Неприводимый многочлен	Десятичный эквивалент
$x+1 \to$ 11	3
$x^2+x+1 \to$ 111	7
$x^3+x+1 \to$ 1011	11
$x^3+x^2+1 \to$ 1101	13
$x^4+x+1 \to$ 10011	19
$x^4+x^3+1 \to$ 11001	25
$x^4+x^3+x^2+x+1 \to$ 11111	31
$x^5+x^2+1 \to$ 100101	37
$x^5+x^3+1 \to$ 101001	4
$x^5+x^3+x^2+x+1 \to$ 101111	47
$x^5+x^4+x^2+x+1 \to$ 110111	55
$x^5+x^4+x^3+x+1 \to$ 111011	59
$x^5+x^4+x^3+x^2+1 \to$ 111101	61
$x^3+x+1 \to$ 1000011	67
$x^7+x^3+1 \to$ 10001001	137
$x^3+x^4+x^3+x^2+1 \to$ 100011101	285
$x^9+x^4+1 \to$ 1000010001	1057

где $k=n-n_0$ — число контрольных символов, равное степени образующего многочлена.

Это равносильно добавлению к информационной кодовой комбинации k нулей справа или продвижению регистра сдвига с записанной в нем информационной кодовой комбинацией на k ячеек. Выбор образующего многочлена будет пояснен далее;

2) к произведению $x^k S_и(x)$ добавляют остаток $R(x)$ от деления $x^k S_и(x)$ на образующий многочлен $P(x)$.

Это вытекает из следующих преобразований. Результат деления $x^k S_и(x)$ на неприводимый многочлен $P(x)$ запишем в виде суммы:

$$x^k\, S_и(x)/P_x = Q(x) + R(x)/P(x), \tag{3.13}$$

где $Q(x)$ — частное от деления без учета остатка; $R(x)$ — остаток от деления, равный вектору ошибки.

Умножая (3.13) на $P(x)$, получаем:

$$x^k\, S_и(x) = Q(x)\, P(x) + R(x). \tag{3.14}$$

Здесь $Q(x)P(x)=F(x)$ — искомый многочлен циклического кода, так как он является произведением многочлена $Q(x)$ на $P(x)$. Из (3.14) с учетом того, что вычитание $R(x)$ по модулю два равнозначно сложению, получим:

$$F(x) = Q(x)\,P(x) = x^k\,S_{\text{и}}(x) + R(x). \qquad (3.15)$$

В этом и заключаются операции при образовании многочлена циклического кода $F(x)$.

Число проверочных символов в коде k, как отмечалось ранее, определяется высшей степенью образующего полинома, поэтому с увеличением k возрастают корректирующие возможности кода.

В соответствии с изложенным выше проверка правильности приема кодовой комбинации состоит в умножении принятого (заданного) многочлена $S_{\text{и}}(x)$ на x^n и делении полученного результата на образующий многочлен $P(x)$. Если остаток от деления равен нулю, то информация принята правильно или возникла необнаруженная ошибка.

Для обнаружения ошибки в принятой кодовой комбинации необходимо, чтобы операция деления на образующий полином

$$x^n\,S_{\text{и}}(x)/P(x) = R(x)/P(x)$$

давала остаток, который имеет вектор ошибки $R(x)$, определяющий местоположение ошибки.

Отметим, что согласно табл. 3.7 образующий полином $P(x)$ всегда имеет 1 в качестве нулевого разрядного коэффициента [например, $P(x)=x+1$; $P(x)=x^3+x+1$ и т. д.]. Это условие образования неприводимого полинома, при выполнении которого полином не может быть представлен в виде сомножителей.

Рассмотрим выбор образующего полинома $P(x)$. При обнаружении **однократных** ошибок в кодовой комбинации полином ошибки (вектор ошибки) $R(x)$ записывается в виде

$$R(x) = x^i,$$

где i — номер разряда, в котором обнаружена ошибка.

Так, для $i=2$, $R(x)=100$, т. е. произошла ошибка во втором разряде.

Для простейшего образующего полинома

$$P(x) = x + 1$$

условие обнаружения однократной ошибки удовлетворяется, так как частное

$$R(x)/P(x) = x^i/(x+1)$$

имеет всегда остаток. Примером такого простейшего кода является код с проверкой по четности (нечетиости), который относится к циклическому коду $(n, n-1)$.

Перейдем к выбору полинома $P(x)$ для обнаружения однократных и двукратных ошибок. В этом случае модель ошибок следующая:

$$R(x) = x^i \oplus x^j,$$

где $i < n > j$. Необходимо найти полиномы $P(x)$ с наименьшей степенью k, образующие остаток при делении на них вектора ошибки $R(x)$.

Из теории следует, что полином $P(x)$ принадлежит степени b, если b — наименьшее положительное число, при котором x^b+1 делится на $P(x)$ без остатка. Для произвольно выбранного k существует не менее одного полинома $P(x)$ степени k, принадлежащей показателю

$$b = 2^k - 1.$$

Так, для $k=3$ $P(x)=x^3+x^2+1$ $b=2^k-1=7$; $(x_b+1)/P(x)=(x^7+1)/(x^3+x^2+1)$, остаток $R'(x)=0$. Следовательно, полином $P(x)=x^3+x^2+1$ принадлежит степени $b=7$.

Код, порожденный полиномом $P(x)$, обнаруживает однократные и двукратные ошибки, если длина кодовой комбинации n не больше рассмотренного выше показателя степени b, к которому принадлежит полином $P(x)$.

Применяя эту теорему для произвольной b-разрядной последовательности, образующей комбинацию циклического кода $(b \leqslant n)$, можно найти полином степени k, позволяющий обнаруживать однократные и двукратные ошибки:

$$b = 2^k - 1,$$

при этом $k \geqslant 3$. Для $k=2$ $n_и=1$. Для $k=3$ $b=n=7$. Этому соответствует циклический код (7.4) с образующим полиномом $P(x)=x^3+x+1$.

Для $k=4$ аналогично $n \leqslant 15$, $n_и=11$; для $k=5$ $n=31$, $n_и=26$ и т. д.

Таким образом, однократные и двукратные ошибки позволяют обнаруживать следующие полиномы $P(x)$:

n	$n_и$	k	$P(x)$
7	4	3	x^3+x+1
15	11	4	x^4+x+1
31	26	5	x^5+x^5+1

Число k корректирующих разрядов циклического кода можно выбирать по следующим формулам.

При исправлении одиночной ошибки, так же как и для кода Хемминга, условие (3.12) запишем в следующем виде:

$$k = \{\log(n+1)\}, \qquad (3.16)$$

где фигурные скобки означают округление до ближайшего большего целого числа.

Для циклических кодов с большими исправляющими возможностями ($d>3$) применяют следующие приближенные (эмпирические) формулы: если кодовое расстояние d нечетное, то

$$k = \left\{\frac{d-1}{2}\log(n+1)\right\}; \qquad (3.17)$$

если кодовое расстояние d четное, то

$$k = \left\{\frac{d-2}{2}\log(n+1)\right\}. \qquad (3.18)$$

Рассмотрим пример кодирования циклическим кодом, если задан многочлен сообщения

$$S_и(x) = x^3 + x^2 + 1,$$

которому соответствует информационная кодовая комбинация $S_и(x) \to 1101$. Задано также кодовое расстояние $d=3$. Для $S_и(x) \to 1101$ $n_0=4$.

1. При заданном $d=3$ из (3.16) выбираем

$$k = \{\log_2(n_0 + k + 1)\} = 3.$$

2. Из табл. (3.7) для $k=3$ выбираем неприводимый (образующий) многочлен $P(x)$ степени не ниже k, у которого число ненулевых членов $P(x)$ должно быть не меньше кодового расстояния d. Выбираем

$$P(x) = x^3 + x + 1,$$

которому соответствует кодовая комбинация $P(x) \to 1011$.

3. Умножим многочлен сообщения $S_и(x)$ на x^k:

$$x^k S_и(x) = (x^3 + x^2 + 1)\, x^3 = x^6 + x^5 + x^3 \to 1101000.$$

4. Разделим произведение $x^k S_и(x)$ на выбранный образующий полином $P(x)$:

$$
\begin{array}{l}
\oplus\ \dfrac{x^6 + x^5 + x^3 \quad |\, x^3 + x + 1}{} \quad \overline{x^3 + x^2 + x + 1} \\
\quad \underline{x^6 + x^4 + x^3} \\
\qquad\quad x^5 + x^4 \\
\qquad \oplus \\
\qquad\quad \underline{x^5 + x^3 + x^2} \\
\qquad\qquad\quad x^4 + x^3 + x^2 \\
\qquad\qquad \oplus \\
\qquad\qquad\quad \underline{x^4 + x^2 + x} \\
\qquad\qquad\qquad x^3 + x \\
\qquad\qquad\qquad \underline{x^3 + x + 1} \\
\text{Остаток} \rightarrow \qquad\qquad\qquad\qquad 1
\end{array}
$$

Следовательно,

$$x^k S_и(x)/P(x) = (x^6 + x^5 + x^3)/(x^3 + x + 1) =$$
$$= x^3 + x^2 + x + 1 + 1/(x^3 + x + 1).$$

Аналогичное деление для кодовых комбинаций:

$$
\begin{array}{l}
\oplus\ 1101000 \quad |\, 1011 \\
\quad \underline{1011} \qquad\quad \overline{1111} \\
\quad\ 1100 \\
\quad \oplus \\
\quad\ \underline{1011} \\
\quad\ \ 1110 \\
\quad \oplus \\
\quad\ \underline{1011} \\
\quad\ \ 1010 \\
\quad \oplus \\
\quad\ \ \underline{1011} \\
\qquad\quad 1
\end{array}
$$

Или в табличной записи:

$$x^k S_и(x)/P(x) \rightarrow 1101000/1011 = 1111 + 001/1011.$$

В соответствии с (3.13)

$$x^k S_и(x)/P(x) = Q(x) + R(x)/P(x) =$$
$$= x^3 + x^2 + x + 1 + 1/(x^3 + x + 1) \rightarrow 1111 + 001/1011,$$
$$\text{где } Q(x) = x^3 + x^2 + x + 1 \rightarrow 1111.$$

Остаток $R(x)/P(x) = 1/(x^3 + x + 1) \rightarrow 001/1011.$

5. Искомый многочлен циклического кода $F(x)$ из (3.14) и (3.15)

$$F(x) = Q(x) P(x) = x^k S_{\text{и}}(x) + R(x) = x^6 + x^5 + x^3 + 1 \to 1111 \cdot 1011 = 1101000 + 001 = 1101001.$$

Следовательно, в начале полученной кодовой комбинации циклического кода (7.4) размещается n_0 информационных символов $S_{\text{и}}(x) \to 1101$ и в конце $k=3$ контрольных символов 001.

Операция умножения многочлена сообщения $S_{\text{и}}(x)$ на x^k осуществляется путем сдвига регистра сдвига с записанной в нем информационной комбинацией $S_{\text{и}}(x)$ на k ячеек, а деление многочлена на образующий многочлен $P(x)$ выполняется на регистре сдвига с обратными связями, включенными через сумматоры по модулю два. Число таких сумматоров равно числу отличных от нуля членов $P(x)$ без учета старшего разряда $P(x)$. Последнее условие вызвано тем, что сумма по модулю два старших разрядов многочлена сообщения $S_{\text{и}}(x)$ и многочлена $P(x)$ всегда равна нулю.

Деление многочленов сводится к сложению по модулю два делителя вначале со старшими членами делимого, затем со старшими членами получающегося остатка, начиная с первого члена, отличающегося от нуля. Процесс деления продолжается до тех пор, пока степень остатка не будет меньше степени делителя. Для деления произвольного многочлена на неприводимый многочлен $P(x)$ со степенью $k=n-n_0$ необходим регистр с числом k ячеек.

Алгоритм кодирования при делении многочлена сообщения $S_{\text{и}}(x)$ на неприводимый многочлен $P(x)$ определяется выражением (3.15). Для этого, как отмечалось ранее, используется k-разрядный регистр сдвига с обратными связями через сумматоры по модулю два. Структурная схема такого кодирующего устройства для неприводимого многочлена степени k без нулевых членов приведена на рис. 3.13.

В начале кодирования ключ Π_1 находится в положении *1*, а ключ Π_2 замкнут. Информационная кодовая комбинация из n_0 импульсов подается непосредственно на выход и одновременно в регистр и за $n_0=n-k$ его тактов формируется остаток $R(x)$, состоящий из контрольных символов. После этого ключ Π_2 размыкается, а ключ Π_1 переводится в положение *2* и контрольные символы за последующие

$k=n-n_0$ тактов выводятся из регистра, непосредственно следуя за информационными символами.

На рис. 3.14 дан пример схемы кодирующего устройства для рассмотренного выше неприводимого многочлена $P(x)=x^3+x+1$ и циклического кода (7, 4). В табл. 3.8 приведено состояние ячеек регистра при кодировании той

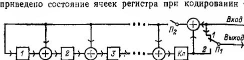


Рис. 3.13. Схема кодирующего устройства для циклического кода с *k*-разрядным регистром сдвига.
1—3 — ячейки.

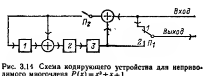


Рис. 3.14 Схема кодирующего устройства для неприводимого многочлена $P(x)=x^3+x+1$.
1—3 — ячейки.

же, что и в примере, приведенном ранее, информационной комбинации $S_и(x)\to 1101$ за семь тактов. Здесь после четвертого такта ключ $П_2$ размыкается, а ключ $П_1$ переводится в положение *2*. В отличие от ранее приведенной табличной записи на выходе в табл. 3.8 первый символ высшего разряда размещен справа, а последний — слева.

Таблица 3.8

Такт	Вход	Состояние ячеек регистра			Выход
		1	2	3	
1	1	1	1	0	1
2	1	1	0	1	11
3	0	1	0	0	011
4	1	1	0	0	1011
5	0	—	1	0	01011
6	0	—	—	1	001011
7	0	—	—	—	1001011

В декодирующем устройстве на приемной стороне принятая кодовая комбинация делится на кодовую комбинацию, соответствующую образующему, неприводимому многочлену $P(x)$. При делении без остатка ошибка отсутствует, или это означает, что принята необнаруженная ошибка. Остаток при делении свидетельствует о наличии ошибки, и по этой кодовой комбинации обнаруживается место или автоматически исправляется ошибка.

Реализация алгоритма декодирования, основанного на делении принимаемого многочлена $S_н(x)$ на образующий

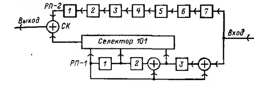


Рис. 3.15. Схема декодирующего устройства для неприводимого многочлена $P(x)=x^3+x+1$.

1—7 — ячейки.

многочлен $P(x)$, выполняется, например, по схеме, приведенной на рис. 3.15. Эта схема рассчитана на тот же, что и в приведенном ранее примере, многочлен $P(x)=x^3+x+1$ и на прием циклического кода (7,4).

Селектор настроен на совпадение с последовательностью символов первого столбца матрицы кода. Это позволяет осуществить коррекцию элементов кодовой комбинации при выводе ее из регистра РП-2.

Принимаемая кодовая комбинация, начиная со старшего разряда, подается на вход декодера и за n тактов записывается в регистре РП-2, имеющем n ячеек. Одновременно за n тактов в регистре РП-1 формируется остаток $R(x)$ от деления принимаемого многочлена $S_н(x)$ на образующий многочлен $P(x)$.

На последующих n тактах кодовая комбинация, записанная в регистре РП-2, выводится на выход через сумматор коррекции $СК$. Одновременно символы в регистре РП-1 сдвигаются влево и при срабатывании селектора на сумматор $СК$ подаются корректирующие импульсы, если

обнаружена однократная ошибка в принятой комбинации.

Для обнаружения или исправления нескольких ошибок схемы декодирующих устройств усложняются, поэтому в телемеханике в основном применяются циклические коды, обнаруживающие одну-две ошибки в кодовой комбинации или исправляющие одну ошибку. Это связано с тем, что в телемеханике широко применяется побайтная передача информации (байт равен 8 бит).

Рассмотренные выше коды с обнаружением и исправлением ошибок относятся к числу блочных кодов. Все по-

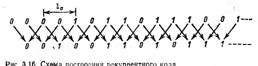


Рис. 3.16. Схема построения рекуррентного кода.

следовательности их символов обычно разделяются на блоки по n символов в каждом (равномерные коды). Кодирование, при котором образуются блоки, и декодирование на приемной стороне, при котором обрабатываются блоки с целью обнаружения и исправления ошибок, производятся с каждым блоком в отдельности.

Все коды разделяются на две большие группы: блочные и непрерывные [23]. В непрерывных кодах деление на блоки отсутствует и операции кодирования и декодирования совершаются непрерывно над последовательностью символов.

Рекуррентные коды относятся к непрерывным и не делятся на блоки. Операции кодирования и декодирования символов кода здесь происходят непрерывно. Широко применяется цепной рекуррентный код, который описывается далее, позволяющий исправлять групповые ошибки (пачки).

Рекуррентные коды обозначаются (n_0/n). Простейшим является код, у которого за каждым информационным следует контрольный (проверочный) символ. Такой код обозначается $(^1/_2)$. Длина контрольных символов при этом равна длине информационных символов: $n_0=k=n/2$, следовательно, избыточность кода

$$D = (n - n_0)\,100/n = (n - 0{,}5n)\,100/n = 50\%.$$

Таблица 3.9

Дискретное время	Состояние ячеек регистра				
	1-я	2-й	3-я	4-я	на выходе сумматора
T_1	1	0	0	0	0
T_2	0	1	0	0	0
T_3	1	0	1	0	1
T_4	1	1	0	1	0
T_5	0	1	1	0	0
T_6	1	0	1	1	1
T_7	1	1	0	1	1
T_8	1	1	1	0	0
T_9	0	1	1	1	1
T_{10}	0	0	1	1	0
T_{11}	1	0	0	1	1

Последовательность контрольных символов (нижняя строка на рис. 3.16) образуется из последовательности информационных символов (верхняя строка на рис. 3.16) путем сложения по модулю 2 информационных символов, отстоящих друг от друга на постоянное расстояние l_0. Схема кодирующего устройства (кодера) с 4-ячеечным регистром сдвига со «связью вперед» приведена на рис. 3.17.

Если на вход кодера подается та же последовательность символов, которая приведена на рис. 3.16:

$$1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1, \qquad (3.19)$$

то на выходе регистра сдвига образуется последовательность символов

$$0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1. \qquad (3.20)$$

Образование последовательности (3.20) иллюстрируется на рис. 3.16 и в табл. 3.9.

Последовательность информационных символов (3.19) соответствует состоянию 1-й ячейки регистра в дискретные моменты времени T_i, а последовательность контрольных (проверочных) символов (3—20) — символам на выходе сумматора по модулю 2.

Последовательность (3.20) получается путем суммирования символов второй и четвертой позиций состояний ячеек предыдущей строки в табл. 3.9. Это соответствует сум-

мированию сигналов на выходе второй и четвертой ячеек регистра сдвига на рис. 3.17.

Коммутатор *Км* на передающей стороне выдает на выход последовательность (3.21), состоящую из первого информационного символа, затем первого проверочного, затем второго информационного и т. д.:

$$1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \quad (3.21)$$

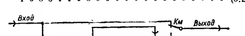


Рис. 3.17. Схема кодирующего устройства рекуррентного кода.
1—4 — ячейки.

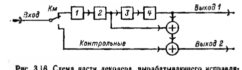


Рис. 3.18. Схема части декодера, вырабатывающего исправляющую последовательность.
1—4 — ячейки.

Последовательность (3.21) и является выходной последовательностью закодированных символов рекуррентного кода ($^1/_2$).

Перейдем к рассмотрению декодера, который состоит из двух частей: 1) вырабатывающей исправляющую последовательность и 2) производящей исправление (коррекцию кода). Схема первой части приведена на рис. 3.18. Коммутатор *Км* декодера работает синхронно и синфазно с коммутатором кодера на рис. 3.17, а регистр сдвига также имеет четыре ячейки (1.4).

На вход декодера подается последовательность символов (3.21), и коммутатор *Км* разделяет ее на информационную последовательность (3.19), подаваемую на вход регистра сдвига, и последовательность контрольных символов (3.20), подаваемую на нижний вход выходного сумма-

тора. Четырехячеечный регистр сдвига декодера имеет такую же схему, как и регистр сдвига в кодере (см. рис. 3.17).

Поэтому, если ошибок нет, последовательность символов на выходе верхнего сумматора на рис. 3.18 совпадает с последовательностью контрольных символов (3.20), подаваемых на вход нижнего сумматора. В этом случае на *Выходе 2* сумматора последовательность символов состоит из одних нулей, а последовательность символов на *Выходе 1* — из последовательности неискаженных информационных символов (3.19).

Если в канале связи между кодером и декодером возникают ошибки, то последовательность символов на *Выходе 2* содержит единицы в определенном расположении, которое позволяет исправлять ошибки. Следовательно, последовательность символов на *Выходе 2* и есть исправляющая последовательность символов.

Рассматриваемый код позволяет исправлять пакет ошибок длиной

$$l \leqslant 2l_0 = 4.$$

Возьмем наихудший случай — серию длиной $2l_0=4$. Такой пакет ошибок поражает только половину информационных символов длиной $l_0=2$ и половину контрольных символов длиной $l_0=2$. Допустим, что на входе декодера (рис. 3.18) появляется первый ошибочный символ и подается пакет ошибок длиной $2l_0=4$. С этого момента и начнем рассмотрение. Регистр до этого момента содержал безошибочные информационные символы. Поэтому первые $l_0=2$ шага регистра дают в последовательности символов на *Выходе 2* декодера положение ошибок в контрольных (проверочных) символах. В дальнейшем контрольная последовательность символов (3.20) содержит только безошибочные символы.

Последующие за этим $l_0=2$ шага: из первого полурегистра выдаются на вход сумматора ошибочные информационные символы, поэтому в последовательности символов на *Выходе 2* также вырабатываются две единицы (в результате сложения с неискаженными символами).

Дальнейшие $l_0=2$ шага: на *Выходе 2* возникают дополнительные две единицы из-за ошибочных информационных символов, возникающих на выходе второго полурегистра. Следовательно, на *Выходе 2* декодера последовательность символов содержит:

1) единицы на местах ошибок в контрольных символах (первые два шага);

2) со сдвигом $l_0=2$ шага единицы на местах ошибок в информационных символах (на третьем и четвертом шагах);

3) то же, что и в п. 2, но с дополнительным сдвигом на $l_0=2$ шага (на пятом и шестом шагах).

Рассмотрим пример возникновения ошибок. Допустим, произошла последовательность ошибок

$$0\;0\;0\;0\;0\;1\;0\;1\;1\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0\;0 \qquad (3.22)$$

Суммируя последовательности символов (3.21) и (3.22), получаем принятую последовательность:

$$1\;0\;0\;0\;1\;0\;1\;1\;1\;0\;1\;1\;1\;1\;1\;0\;0\;1\;0\;0\;1\;1 \qquad (3.23)$$

которая в рассматриваемом примере подается на вход декодера.

Коммутатор *Км* в схеме на рис. 3.18 разделяет последовательность (3.23) на информационные

$$1\;0\;1\;1\;\underline{1}\;1\;1\;1\;0\;0\;1 \qquad (3.24)$$

и контрольные символы

$$0\;0\;\underline{0}\;1\;0\;1\;1\;0\;1\;0\;1 \qquad (3.25)$$

Последовательности символов (3.24) и (3.25) содержат ошибочные символы, которые подчеркнуты. Регистр сдвига на рис. 3.18 выдаст последовательность символов

$$0\;0\;1\;0\;0\;1\;0\;0\;0\;0\;1 \qquad (3.26)$$

которая в сумме с последовательностью (3.25) даст исправляющую последовательность

$$0\;0\;1\;1\;0\;0\;1\;0\;1\;0\;0 \qquad (3.27)$$

Автоматическая операция исправления последовательности (3.24), возникающей на *Выходе 1* декодера с помощью исправляющей последовательности (3.27) на *Выходе 2* (рис. 3.18), осуществляется с помощью схемы исправления ошибок, приведенной на рис. 3.19. Эта схема является продолжением схемы на рис. 3.18 (*Выход 1* соединяется с *Входом 1*, а *Выход 2* — с *Входом 2*).

Исправляющая последовательность (3.27) подается непосредственно на инвертирующий элемент *НЕ*, который преобразует символы 1 в 0, а 0 в 1 и подает их на левый вход логического элемента *И* в виде последовательности (3.28)

(см. ниже). Схема нижнего регистра сдвига такая же, как и на рис. 3.18. С выхода ячейки *2* исправляющая последовательность (3.27) подается со сдвигом на $l_0=2$ шага на нижний вход элемента *И* в виде последовательности (3.29) (см. ниже), а с выхода ячейки *4* регистра — на правый вход элемента *И* в виде последовательности (3.30) (см. ниже), сдвинутой на $2l_0=4$ шага. В результате на выходе логического элемента *И* получим последовательность (3.31) (см. ниже)

```
1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 ...      (3.28)
. . 0 0 1 1 0 0 1 0 1 ...      (3.29)
. . . . 0 0 1 1 0 0 1 ...      (3.30)
-------------------------
        0 0 0 0 0 0 1 ...      (3.31)
```

Точки в последовательностях слева обозначают сдвиг символов. Единица на выходе элемента *И* возникает только в тех случаях, когда на все его три входа подаются единицы. Она представляет собой команду исправить ошибку.

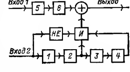


Рис. 3.19. Схема части декодера, исправляющего ошибки.
1—6 — ячейки.

Последовательность принятых информационных символов (3.24) остается сдвинуть так, чтобы команды исправлять ошибки были поданы согласованно. Эту функцию выполняют $l_0=2$ ячейки регистра сдвига на входе *1* (рис. 3.19).

Исправленная последовательность (3.31) вырабатывается на выходе схемы в виде суммы последовательностей символов (3.32) и (3.33) (см. ниже), которые являются последовательностями (3.31) и (3.24), сдвинутыми соответственно на $2l_0=4$ шага и $3l_0=6$ шагов в соответствии с числом ячеек регистров сдвига, включенных последовательно:

```
.... 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0      (3.32)
,... . . 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 1    (3.33)
----------------------------------
         1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1      (3.34)
```

После автоматического исправления последовательность (3.34) совпадает с (3.19). Как следует из (3.34), на пути информационных символов включено $3l_0=6$ ячеек регист-

ров сдвига. При этом для вывода всех ошибочных символов необходим защитный интервал длиной $6l_0+1=13$ символов.

Сложность аппаратуры для рекуррентного кода оценивается по числу ячеек регистров сдвига. Кодирующее устройство имеет $2l_0=4$ ячейки регистра, а декодирующее $5l_0=10$ ячеек, из которых исправляющая схема имеет $3l_0=6$ ячеек.

Был рассмотрен простейший рекуррентный код ($^1/_2$). Для увеличения защищенности кода и пакета исправляемых ошибок увеличивают n, т. е. используют коды $[(n-1)/n]$. Схемы таких кодирующих и декодирующих устройств несколько усложняются.

К недостаткам рекуррентного кода относится необходимость иметь интервал времени с неискаженными символами после прохождения пакета ошибок (см. § 4.5). Это может вызывать дополнительные искажения, если пакет ошибок по длине больше допустимого.

Рекуррентный код реализуется простыми техническими средствами, и в связи с этим его применение в последние годы расширяется, однако в телемеханике такие коды не применяются в основном из-за целесообразности побайтных передач.

3.5. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ КОДИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Закодированные последовательности символов могут передаваться однократно, с повторением или более сложно, например с использованием обратного канала, в зависимости от допустимой вероятности возникновения ошибок. Способы передачи кодов позволяют дополнительно для данного кода повысить помехоустойчивость (достоверность) передачи до заданного значения (методами повышения избыточности сообщения или обратного канала).

В подавляющем большинстве систем телемеханики есть значительные резервы в пропускной способности каналов связи. Для повышения достоверности передачи в таких условиях широко используется простейший двоичный неизбыточный код с повторением и проверкой на идентичность принятых элементов. Такой метод передачи позволяет обнаруживать одиночные и частично двойные ошибки при сравнительно простой аппаратурой реализации (запись на регистрах и сравнение элементов по модулю 2).

При резервах в пропускной способности канала связи применяются также метод передачи сообщений с повторением кодовых комбинаций несколько раз и выбор правильной комбинации путем «голосования» (мажоритный способ). Широко применяются двукратное повторение кода и выбор комбинации, которая дважды из трех повторнлась одинаково («голосование» два из трех). Используется поразрядное «голосование». Перечисленные способы передачи кодов требуют только один прямой канал связи.

Для повышения защищенности передачи сообщений от ошибок широко применяется метод обратной связи (обратного канала), требующий использования обратного канала.

Системы с обратной связью принято разделять на системы с информационной и системы с решающей обратной связью. В системах с информационной обратной связью принятый сигнал запоминается и передается по обратному каналу на передающую сторону. Здесь он сличается с первичным сигналом, и при искажении посылается команда стирания искаженного сигнала или подтверждение правильно принятого. В системах с решающей обратной связью решение о правильности принятого сигнала вырабатывается на приемной стороне. Для этого используются коды с обнаружением ошибок и по обратному каналу посылается запрос повторения передачи при обнаружении ошибки. Запрос повторяется несколько раз до приема неискаженной кодовой комбинации. Такую систему часто называют *системой с переспросом.*

Необходимо отметить, что в ранних разработках систем ТУ, ТС, ТИ использовались самые разнообразные коды и способы передачи. При дальнейшем развитии, с переходом к более массовым унифицированным решениям, с применением интегральных микросхем и конструкций в виде типовых блоков, субблоков и модулей наметились тенденции к сокращению разнообразия кодов и способов передачи кодированных сигналов. Характерен переход главным образом к адресным передачам цифровыми кодами, удовлетворяющим требованиям для самых разнообразных сообщений.

Повышение достоверности передачи достигается путем применения кодов с обнаружением ошибок и использования обратного канала для переспроса. При защитном отказе команда или другой сигнал повторяются. Широко принято автоматическое повторение до 3 раз при защитных отказах, после чего возникает аварийный сигнал, если код не принят.

Сигналы телесигнализации, как правило, передаются многоканально с временным разделением сигналов и возможностью передачи всех сигналов за один цикл запроса. Для повышения достоверности передачи сигналов широко применяется описанная выше защита на четность (или нечетность).

Области применения цифровых систем продолжают расширяться.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

КАНАЛЫ СВЯЗИ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Каналом связи называется совокупность технических средств и тракта (среды, кабеля, проводной линии) *для передачи сообщений на расстояние.* Передача по заданному каналу осуществляется независимо от других каналов. Каналы связи организуются в линии связи, определение которой дано во введении. Число каналов в одной линии связи определяется полосой пропускания линии и полосой частот канала связи.

Число одинаковых каналов связи, размещаемых в линии связи,

$$N_k = K\Delta f_{\text{л.с}}/\Delta f_{\text{к.с}},$$

где $\Delta f_{\text{л.с}}$ — полоса пропускания линии связи; $\Delta f_{\text{к.с}}$ — полоса пропускания канала связи; K — коэффициент, учитывающий полосу затухания фильтров при частотном разделении каналов или защитные интервалы по времени при временном разделении каналов. В системах с кодовым разделением каналов коэффициент K учитывает также статистику сообщений.

Классификация линий связи по характеру используемых колебаний для передачи сообщений приведена в табл. 4.1.

Каналы связи принято классифицировать по их назначению, характеру колебаний, используемых для передачи, а также по конструктивным и другим признакам.

По назначению каналы связи разделяются на телефонные, телеграфные, фототелеграфные, телевизионные и др.;

по характеру эксплуатации — на выделенные и коммутируемые. Выделенные, или або-

Таблица 41

Тип линии связи	Наименование линии связи	Диапазон частот
Механическая	Жесткая	<10 Гц
	Гидравлическая	<10 Гц
	Пневматическая	<10 Гц
Акустическая	Акустическая с воздушной средой	10 Гц—1 МГц
	Гидроакустическая	10 Гц—10 МГц
Электрическая (проводная)	Воздушная	0—200 кГц
	Симметричный кабель	0—1 МГц
	Коаксиальный кабель	0—15 МГц
Радио (беспроводная)	Радиосвязи	10 кГц—$3 \cdot 10^6$ МГц
	Радиорелейная	30 МГц—$3 \cdot 10^4$ МГц
	Космическая	30 МГц—$3 \cdot 10^4$ МГц
Оптическая	Оптическая с открытой средой	0,3—$1 \cdot 10^{15}$ Гц
	Волоконно-оптическая	0,3—$0,8 \cdot 10^{15}$ Гц

нируемые, каналы связи могут быть телеграфными, телефонными или другими, постоянно включенными между двумя пунктами. Коммутируемые каналы выделяются только по вызову и могут иметь изменяющиеся параметры (состоят из разных в различное время составных каналов). Коммутируемые каналы при сигнале отбоя автоматически отключаются, так же как отключается цепь после окончания телефонного разговора.

В зависимости от характера колебаний, используемых для передачи сообщений, каналы называются электрическими, электромагнитными, оптическими, акустическими, пневматическими и т. д. Для передачи сообщений телеконтроля и телеуправления в подавляющем большинстве случаев используются электрические и электромагнитные каналы.

Приведем основные сведения по наиболее широко применяемым каналам и линиям, в которых сообщения передаются с помощью электрических колебаний (кабельные и воздушные проводные линии) или электромагнитных колебаний в диапазоне радиоволн (радиоканалы и высокочастотные каналы).

Наиболее массовые телефонные, телеграфные и телевизионные каналы, организуемые в электрических, радио и волоконно-оптических линиях связи, имеют типовую полосу

пропускания, нормированные входной и выходной уровни сигналов, уровень помех и другие показатели. Телевизионный канал имеет полосу пропускания 6 МГц, телефонный — от 300 до 2000—3200 Гц. Такой канал может быть дополнительно уплотнен по частоте каналами тонального телеграфирования (телеграфными каналами) с полосой пропускания 120—140 Гц каждый. Вместо одного телефонного канала образуется 12—19 таких каналов.

Для каналов телеконтроля и телеуправления в СССР широко применяется специальная аппаратура, образующая до 19 вторичных каналов телеконтроля и телеуправления в одном телефонном канале. При этом полоса пропускания каждого канала ТУ — ТС составляет 140 Гц, а максимальная скорость передачи 50—75 Бод (число импульсов в секунду). Для передачи сигналов с повышенной помехоустойчивостью используется частотная модуляция несущей частоты $f_н$ в диапазоне 370—3400 Гц. Несущая частота выбирается по формуле

$$f_н = 450 + 180\,(n + 1), \tag{4.1}$$

где n — номер канала.

Уровень передачи на один канал выбирается от —2 до +1 Нп; перекрываемое затухание — до 4 Нп (формула для измерения в неперах дана в § 4.2).

Полоса пропускания телефонного или телеграфного канала Δf и скорость передачи импульсов v в бодах связаны следующими соотношениями:

при амплитудной модуляции

$$\Delta f_{АМ} \approx 1{,}25v; \tag{4.2}$$

при частотной модуляции

$$\Delta f_{ЧМ} \approx 3v. \tag{4.3}$$

В настоящее время проектируется и строится единая система связи Советского Союза, предусматривающая резкое увеличение емкости каналов связи по всей стране, от районной сети до магистральных линий. Единая система связи будет иметь телеграфные, телефонные, телевизионные и другие каналы. Вступают в строй радиорелейные, кабельные и другие линии, рассчитанные на одновременную работу многих сотен тысяч каналов связи, связывающих крупные промышленные и административные центры.

Системы телеуправления и телеконтроля, используемые внутри завода, на промыслах, в шахтах, будут и в дальней-

шем иметь специализированные каналы связи, принадлежащие данному предприятию или организации. В системах с протяженными каналами связи, например в энергообъединениях, на магистральных трубопроводах, в ирригации и т. д., каналы будут абонироваться, главным образом, в организациях связи и один типовой телеграфный или телефонный — для передачи сообщений между пунктом управления и многими сосредоточенными или рассредоточенными объектами ТУ, ТС, ТИ.

Таким образом, типовой телефонный или телеграфный канал связи будет уплотняться для передачи сообщений телеконтроля и телеуправления.

4.2. ПРОВОДНЫЕ ЛИНИИ

Проводные линии (воздушные и кабельные) характеризуются **первичными** (погонное активное последовательное сопротивление, емкость, индуктивность и проводимость) и **вторичными параметрами** (*затухание, волновое сопротивление и пропускная способность*). Пропускная способность линии определяется ее полосой пропускания, уровнем помех и максимальным допустимым уровнем сигнала в линии.

Сопротивление линии постоянному току при температуре t, отличной от сопротивления при $t=20$ °С,

$$R_t = R_0 [1 + a (t - 20)], \qquad (4.4)$$

где R_0 — сопротивление при $t=20$ °С, Ом; a — температурный коэффициент, который для меди равен 0,0039, а для стали 0,0046.

Сопротивление линии существенно зависит от температуры. Так, при изменении температуры стальной цепи от —40 до +40 °С ее сопротивление согласно (4.4) изменяется на 37 %.

Активное сопротивление линии переменному току возрастает с частотой (рис. 4.1), что связано в первую очередь с поверхностным эффектом.

Индуктивность двухпроводной цепи из однородных (не биметаллических) проводов (рис. 4.2)

$$L = [4 \ln (a/r) + K_п \mu] 10^{-4}, \qquad (4.5)$$

где a — расстояние между центрами проводов, см; r — радиус проводов, см; μ — относительная магнитная проницаемость материала провода (для меди $\mu_м=1$, для стали $\mu_с=140$); $K_п$ — табличный коэффициент, учитывающий поверхностный эффект.

Емкость двухпроводной цепи определяется по формуле

$$C = \varepsilon \cdot 10^{-6}/36 \ln (a/r), \qquad (4.6)$$

где ε — относительная диэлектрическая постоянная (для воздуха ε=1).

Емкость однопроводной цепи

$$C = \varepsilon \cdot 10^{-6}/18 \ln (2h/r), \qquad (4.7)$$

где h — расстояние от поверхности земли до провода, м.

Первичные параметры типовых воздушных и кабельных цепей при частоте $f_0=0$ и температуре $t=+20\,°C$ на 1 км длины двухпроводной цепи приведены в табл. 4.2.

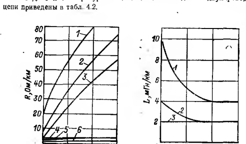


Рис. 4.1. Зависимость активного сопротивления проводов линии от частоты.

1 — сталь, $d=3$ мм; 2 — сталь, $d=4$ мм; 3 — сталь, $d=5$ мм; 4 — биметалл (сталь—медь), $d_1=3{,}2$ мм, $d_2=4$ мм; 5 — медь, $d=3$ мм; 6 — медь, $d=4$ мм.

Рис 4.2. Зависимость индуктивности двухпроводной цепи от частоты

1 — сталь, $d=4$ мм, 2 — биметалл, $d_1=3{,}2$ мм, $d_2=4$ мм; 3 — медь, $d=4$ мм

Волновое сопротивление цепи, являющееся вторичным параметром,

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \qquad (4.8)$$

где G — активная составляющая проводимости.

На высоких частотах или при малых потерях $R \ll \omega L$ и

$$G \ll \omega C,$$

тогда из (4.8)

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (4.9)$$

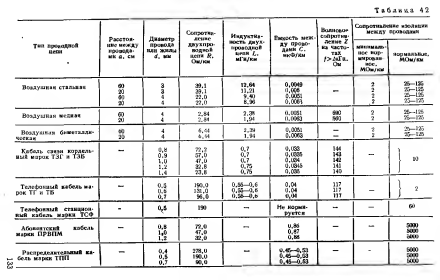


Таблица 42

Тип проводной цепи	Расстояние между проводами *a*, см	Диаметр провода или жилы *d*, мм	Сопротивление двухпроводной цепи *R*, Ом/км	Индуктивность двухпроводной цепи *L*, мГн/км	Емкость между проводами *C*, мкФ/км	Волновое сопротивление *Z* на частотах $f > 2$ кГц, Ом	Сопротивление изоляции между проводами	
							минимальное нормированное, МОм/км	нормальное, МОм/км
Воздушная стальная	60 20 60 20	3 3 4 4	39,1 39,1 22,0 22,0	12,64 11,21 9,40 8,96	0,0049 0,006 0,0051 0,0063	—	2 2 2 2	25—125 25—125 25—125 25—125
Воздушная медная	60 20	4 4	2,84 2,84	2,38 1,94	0,0051 0,0063	690 560	2 2	25—125 25—125
Воздушная биметаллическая	60 20	4 4	6,44 6,44	2,39 1,94	0,0051 0,0063	— —	2 2	25—125 25—125
Кабель связи кордельный марок ТЗГ и ТЗБ	—	0,8 0,9 1,0 1,2 1,4	72,2 57,0 47,0 32,8 23,8	0,7 0,7 0,7 0,75 0,75	0,033 0,0335 0,034 0,0345 0,035	144 143 142 141 140	—	10
Телефонный кабель марок ТГ и ТБ	—	0,5 0,6 0,7	190,0 131,0 96,0	0,55—0,6 0,55—0,6 0,55—0,6	0,04 0,04 0,04	117 117 117	—	2
Телефонный станционный кабель марки ТСФ	-	0,5	190	—	Не нормируется	—	—	60
Абонентский кабель марки ПРВПМ	—	0,8 1,0 1,2	72,0 47,0 32,0	—	0,86 0,87 0,88	—	—	5000 5000 5000
Распределительный кабель марки ТПП	—	0,4 0,5 0,7	278,0 190,0 90,0	—	0,45—0,53 0,45—0,53 0,45—0,53	—	-	5000 5000 5000

При нагрузке однородной линии на резистор, сопротивление которого равно ее волновому сопротивлению, отражения в линии отсутствуют и ее пропускная способность резко возрастает.

Постоянная передачи линии, называемая также коэффициентом распространения,

$$\gamma = \alpha + j\varphi = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}\,, \qquad (4.10)$$

где α — постоянная (коэффициент) затухания линии; φ — коэффициент сдвига фаз между напряжением и током в линии.

Зависимость постоянной затухания α, выраженной в неперах, от частоты в различных цепях приведена на рис. 4.3.

Рис. 4.3. Зависимость постоянной затухания α от частоты.

1 — сталь, $d=3$ мм, $a=20$ см; 2 — сталь, $d=3$ мм, $a=60$ см; 3 — сталь, $d=4$ мм, $a=20$ см; 4 — сталь, $d=4$ мм, $a=60$ см; 5 — кабель $d=0.9$ мм; 6 — кабель, $d=1,4$ мм; 7 — медь, $d=4$ мм, $a=20$ мм; 8 — медь, $d=4$ мм, $a=60$ см; 9 — биметалл (медь—сталь), $d_1=3.2$ мм, $d_2=4$ мм, $a=20$ см, 10 — биметалл, $d_1=3,2$ мм, $d_2=4$ мм, $a=60$ см (a — расстояние между проводами).

Допустим, что в начале линии мощность сигнала P_1, а на ее выходе P_2, тогда затухание, вносимое линией, в неперах (Нп)

$$b_{\text{н}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}\,,$$

а в децибелах (дБ)

$$b_{\text{д}} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}\,.$$

Следовательно,

$$b_{\text{д}} = 8{,}69 b_{\text{н}}.$$

Для оценки мощности сигнала в проводной связи используют логарифмическую шкалу, при этом мощность сигнала в линии (в неперах) вычисляется по формуле

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{P_0}\,,$$

Таблица 4.3

(+) мВт	±дБ	(−) мВт	(+) мВт	±дБ	(−) мВт
1	0	1	7,943	9	0,126
1,259	1	0,794	10	10	0,1
1,585	2	0,631	31,62	15	0,0316
1,995	3	0,501	100	20	0,01
2,512	4	0,398	$1\cdot10^3$	30	$1\cdot10^{-3}$
3,162	5	0,316	$10\cdot10^3$	40	$0,1\cdot10^{-3}$
3,981	6	0,251	$100\cdot10^3$	50	$0,01\cdot10^{-3}$
5,012	7	0,200	$1\cdot10^6$	60	$0,001\cdot10^{-3}$
6,310	8	0,158			

где $P_0=0,775^2/600\cdot10^3=1$ мВт — мощность условного нулевого уровня (при напряжении 0,775 В на сопротивлении 600 Ом); P — мощность сигнала, мВт

Если уровень сигнала U выражается в вольтах и сопротивление отлично от 600 Ом, то мощность

$$P_{\text{н}}=\ln\frac{U}{0,775}-\frac{1}{2}\ln\frac{|Z|}{600},$$

где $|Z|$ — модуль сопротивления линии, Ом

Мощность на выходе линии длиной l

$$P_{\text{вых}}=P_{\text{вх}}-\alpha l,$$

где $P_{\text{вх}}$ — мощность на входе линии, Нп; α — удельное затухание линии, Нп/км.

Перевод децибел в ватты при общепринятом условном нулевом уровне, равном 1 мВт, приведен в табл. 4.3, а децибел в отношение мощностей — в приложении 3.

Если известно допустимое затухание b (в децибелах или неперах), то допустимая длина линии связи

$$l=b/\alpha,$$

где α — удельное затухание линии.

Определим для примера допустимую длину цепи из стальных проводов диаметром $d=4$ мм с расстоянием между проводами $a=80$ см при частоте $f=2000$ Гц, если допустимое затухание $b_{\text{н}}=3$ Нп.

Из рис. 4.3 $\alpha=0,026$ Нп/км, $l=b/\alpha=3/0,026=115$ км.

Затухание и проводимость (утечка) воздушной линии в значительных пределах изменяются от климатических условий (дождь, иней, гололед) и не в меньшей степени от качества обслуживания линии связи.

Таблица 44

Тип линии	Диаметр провода, мм	Диапазон частот, кГц	Затухание, Нп/км
Воздушная стальная цепь	4	3—30	0,038—0,16
Воздушная медная цепь	4	5—150	0,038—0,027
Кордельный кабель, экранированная симметричная цепь	1 4	10—150	0,095—0,36

Параметры кабельных линий зависят в основном от температуры грунта и почти не зависят от других внешних условий, поэтому они более стабильны, чем у воздушных линий.

Высокочастотным каналом называется канал проводной линии связи, передающий сигналы на расстояние в виде токов высокой частоты. Частотное уплотнение тсками высокой частоты позволяет образовать в проводной линии связи большое число дополнительных каналов. Такие каналы широко применяются в телефонной, телеграфной, телевизионной и другой связи с воздушными стальными, медными и биметаллическими цепями или симметричными и коаксиальными кабелями.

Для повышения эффективности и помехоустойчивости широко применяется передача на одной боковой полосе частот. Рабочий диапазон частот делится при этом на отдельные полосы по 4 кГц, причем по рекомендации Международного консультативного комитета по телефонии и телеграфии (МККТТ) полоса 300—3400 Гц используется для передачи речи (телефонный канал), а полосы 0—300 и 3400—4000 Гц — для запирания разделительных фильтров и организации узкополосных служебных каналов и каналов телемеханики [60].

В высокочастотных каналах с воздушными стальными линиями из-за резкого возрастания затухания в стали с ростом частоты используется диапазон частот от 3 до 25 кГц. В этом диапазоне обычно размещается три телефонных канала с двусторонней (дуплексной) передачей информации с полосой пропускания каждого телефонного канала связи 300—2700 Гц. В многоканальных системах связи с воздушными медными и биметаллическими цепями используется диапазон частот от 6 до 157 кГц.

Половина высокочастотного диапазона в воздушной линии используется для передачи в одном направлении, а половина — в обратном. Все многоканальные системы, за исключением трехканальных, образуют группы по 12 телефонных каналов с суммарной шириной полосы каждого телефонного канала 4 кГц.

Несколько больший диапазон частот имеют симметричные кабели (12—550 кГц). По таким кабелям передача в прямом и обратном направлениях осуществляется или в разных диапазонах частот, или в одном и том же диапазоне по двум кабелям.

Наиболее широкополосным являются коаксиальные кабели. Они имеют рабочий диапазон до 8850 кГц и более, при этом весь диапазон дополнительно делится на вторичные 60-канальные группы. Передача в прямом и обратном направлениях осуществляется в кабельных линиях на одинаковых частотах по различным парам одного и того же или различных кабелей.

Для перекрытия затухания и уменьшения влияния помех в высокочастотных каналах применяются промежуточные усилители, устанавливаемые на расстояниях от 1,5 до 250 км.

Затухание некоторых проводных линий приведено в табл. 4.4.

Затухание обычных коаксиальных кабелей α на километр определяется по формуле

$$\alpha = 0,28 \sqrt{f}, \tag{4.11}$$

где f — частота, МГц.

В воздушных линиях затухание изменяется главным образом от атмосферных условий, а в кабельных — от температуры грунта. Кроме того, со временем обычно изменяется коэффициент усиления промежуточных усилителей. Поэтому чтобы поддержать выходной уровень сигнала постоянным, применяется автоматическая регулировка усиления (АРУ).

Каналы связи по воздушным линиям электропередач высокого напряжения (ВЛ) широко применяются в энергосистемах для связи и передачи телемеханических сообщений. Они начинают применяться для телеконтроля и телеуправления местными электростанциями, подстанциями и другими установками в сельском хозяйстве.

Линии электропередачи 35, 110, 220 и 400 кВ имеют высокую электрическую и механическую прочность, поэтому каналы связи по ВЛ характеризуются высокой надежностью работы, если применяется высоконадежная аппаратура каналов. Передача сигналов по ВЛ осуществляется токами высокой частоты в диапазоне от 300 до 500 кГц, а по некоторым воздушным линиям — и до 1000 кГц. В кабельных силовых сетях используются более низкие частоты (до звуковых).

Каналы связи по ВЛ имеют сравнительно высокий уровень помех, поэтому для получения достаточного для нормальной работы отношения сигнал/помеха применяются специальная аппаратура каналов со сравнительно высокой выходной мощностью сигналов и качественные фильтры для разделения сигналов и уменьшения перекрестных по-

мех. Уровень сигнала на линиях 35—220 кВ составляет примерно +4,5 Нп (10 Вт) при входном сопротивлении линии 400—600 Ом.

Затухание на километр длины в диапазоне частот 50—300 кГц для ВЛ длиной до 300 км, мНп/км,

$$b = K\sqrt{f}, \qquad (4.12)$$

где f — частота, кГц

Для линий 35 кВ $K=1{,}4$, для линий 110 кВ $K=1{,}0$, для линий 220 кВ $K=0{,}75$ и для линий 400 кВ $K=0{,}83$

Для получения стабильного канала связи применяется высокочастотная обработка линий. Затухание обработанной ВЛ почти не зависит от заземления, отключения концов линий или других коммутационных переключений в электросети.

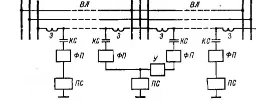


Рис. 4.4. Схема фаза — земля для передачи высокочастотных сигналов по ВЛ.

З — заградитель; *КС* — конденсатор связи; *ФП* — фильтр присоединения; *ПС* — пост связи; *У* — усилитель.

Для высокочастотной обработки и присоединения используются выпускаемые промышленностью высокочастотные заградители, конденсаторы связи и фильтры присоединения, включаемые по принятой схеме канала: фаза — земля, фаза — фаза или др. (рис. 4.4).

Переходное сопротивление между соседними обработанными линиями ВЛ сравнительно невелико из-за значительной емкости шин и оборудования подстанций. По этой причине одинаковые частоты на разных линиях в одной сети не используются, что существенно снижает число рабочих каналов. Для повышения эффективности передачи по ВЛ и помехоустойчивости применяется аппаратура высокочастотных каналов, работающая на одной боковой полосе (ОБП), с амплитудной или частотной модуляцией (АМ — ОБП или ЧМ — ОБП).

Характерной чертой беспроводных радиоканалов является возможность значительного воздействия помех от соседних радиостанций и промышленных источников радиопомех при работе систем вблизи крупных промышленных объектов по сравнению с проводными каналами. Уровень помех возрастает с увеличением мощности источников помех и уменьшением расстояния до них. При неудачном выборе диапазона частот и отсутствии пространственной селекции, осуществляемой направленными антеннами, надежность радиоканала может быть очень низкой. Из-за относительно большого уровня помех, в том числе от мощных радиостанций и резко изменяющихся условий распространения, в каналах телеконтроля и телеуправления при передаче на дальние расстояния редко используется диапазон коротких волн.

Наиболее эффективный путь повышения надежности радиоканала заключается в пространственной селекции, реализуемой путем применения резконаправленных передающих и приемных антенн. Пространственная селекция сравнительно просто реализуется в диапазоне ультракоротких волн.

При использовании радиоканала в системе телемеханики целесообразно (если это возможно) выбирать уже разработанную радиоаппаратуру, выпускаемую промышленностью, приспосабливая ее к передаче телемеханической информации. Этот путь обычно позволяет значительно сократить большой объем работ, возникающих при разработке приемопередающей аппаратуры и антенн радиолинии. Для расстояний, не превышающих нескольких десятков километров, используются типовые приемопередающие радиостанции, рассчитанные на один телефонный канал с полосой 300—3000 Гц.

Для расстояний, превышающих прямую видимость, используются радиорелейные линии с ретрансляционными пунктами, работающие в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн и рассчитанные на ряд телефонных каналов. Среднее расстояние между ретрансляционными станциями составляет 40—60 км. Следует учитывать, что типовые проводные воздушные линии связи значительно уступают кабельным и радиорелейным по достоверности передачи информации.

Космические радиолинии работают в диапазоне ультракоротких (сантиметровых и дециметровых) радиоволн с резконаправленными антеннами. Для космических аварийных радиолиний используются диапазон коротких и ультракоротких волн и ненаправленные антенны.

Космические радиолинии «Земля—Космос» используются для управления траекторией полета, устройствами на космическом аппарате, для ретрансляции сигналов и радиосвязи с космонавтами. Радиолинии

«Космос—Земля» используются для передачи телеметрической информации, ретрансляции сигналов и радиосвязи.

Космические радиолинии разделяются на радиолинии ближнего и дальнего космоса. Для ближнего космоса с дальностью, не превышающей нескольких десятков тысяч километров, строят радиолинии с пропускной способностью порядка миллионов двоичных единиц в секунду с полосой пропускания приемника порядка десятков мегагерц, рассчитанные на несколько телевизионных каналов. Такие радиолинии работают в основном с цифровыми кодами и кодовым разделением каналов.

В радиолиниях дальнего космоса с дальностью не менее нескольких десятков миллионов километров при допустимой вероятности ошибки единичного символа примерно 10^{-5} трудно обеспечить скорость передачи, превышающую несколько двоичных единиц или десятков единиц в секунду. Полоса пропускания радиолинии имеет соответствующее значение. Широко применяется фазовая модуляция. Несущие частоты имеют высокую стабильность. Применяется автоподстройка фазы несущей.

4.4. СВЕТОВОДНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

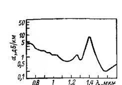
В технике связи намечается крупнейшая революция, которая приведет в ближайшие десятилетия к вытеснению медных кабелей связи световодными в подавляющем большинстве практических применений и к массовому внедрению самых разнообразных телевизионных видов связи, таких, как видеотелефон, сервисные (справочные, обучающие, развлекательные и др.) системы обслуживания, благодаря резкому расширению рабочей полосы частот. По-видимому, основными каналами связи в дальнейшем будут световодные для стационарных систем связи и радиоканалы для космических и подвижных. В настоящее время такие системы либо уже эксплуатируются, либо проходят опытные испытания.

Успешное использование световодных линий обусловлено созданием волоконно-оптических (световодных) кабелей с очень малым затуханием, которое меньше чем у лучших коаксиальных медных кабелей. Первые световодные кабели были созданы в начале 70-х годов, а в настоящее время промышленность выпускает их различные модификации. Для примера на рис. 4.5 приведено погонное затухание α одного из лучших световодных кабелей в зависимости от длины волны λ [16].

Если для магистральных линий связи с лучшими широкополосными коаксиальными медными кабелями требуются усилительные пункты через каждые 1,5 — 1,7 км, то для световодных кабелей связи необходимо иметь ретрансляторы (регенераторы) импульсных цифровых сигналов на расстояниях при-

мерно в 10 раз больших при пропускной способности линии связи также во много раз большей. Это резко снижает стоимость каналов связи, тем более что в дальнейшем световодные кабели будут стоить значительно дешевле медных, так как габариты и масса световодных кабелей значительно меньше медных, а запасы кремния и кварца, используемых для их изготовления (в отличие от запасов меди), неограниченны.

Резкое уменьшение затухания световодных кабелей было достигнуто путем повышения чистоты кварцевого или обычного стекла и применения наружной оболочки с меньшим коэффициентом преломления.



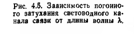


Рис. 4.5. Зависимость погонного затухания световодного канала связи от длины волны λ.

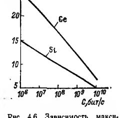


Рис. 4.6. Зависимость максимального расстояния между ретрансляторами от скорости передачи информации при длине волны $\lambda = 0{,}8$ мкм (Si) и $\lambda = 1{,}3$ мкм (Ge).

Диаметр внутреннего световодного волокна около 0,1 мм.

Очень ценным свойством световодных кабелей является уменьшение влияния всевозможных помех (на несколько десятичных порядков меньше по сравнению с помехами в медных кабелях), что позволяет использовать более простые защищенные коды и резко повысить пропускную способность кабеля.

На рис. 4.6 приведена расчетная зависимость максимального расстояния между ретрансляторами от скорости передачи информации на длинах волн 0,8 (*Si*) и 1,3 мкм (*Ge*). Известны эксперименты, например, с передачей информации со скоростью 100 Мбит/с на расстояние 63 км без ретрансляторов с вероятностью ошибки 10^{-9} в диапазоне волн $\lambda = 1 \div 1{,}6$ мкм.

В настоящее время уже освоенным, но менее перспективным считается диапазон волн с $\lambda < 1$ мкм, для которого созданы оптические разъемы, излучатели, приемники, оптические усилители, модуляторы и различные конструкции кабелей с одним волокном и многими независимыми.

Широко используются лазерные излучатели, фотодиоды и другие оптоэлектронные элементы.

Лучшие результаты по затуханию световодных кабелей будут получены в менее освоенном диапазоне волн $\lambda = 1 \div 1,6$ мкм. Чтобы заменить, например, обычную кабельную систему, используемую в телевидении, на световодную, необходимо заменить медный коаксиальный кабель световодным и внести некоторые изменения в передающую и приемную аппаратуру, преобразующую уже сформированный электрический сигнал в световой на передающей стороне и световой в электрический на приемной. Сформированный электрический сигнал, передаваемый ранее в коаксиальный кабель, теперь подается на световой модулятор, управляющий интенсивностью светового излучения лазера. На приемной стороне производится преобразование светового сигнала в электрический. В световодных каналах применяется временно́е циклическое или временно́е кодовое разделение каналов, а устройства связи строятся по принципу цифровых.

4.5. ПОМЕХИ В КАНАЛАХ СВЯЗИ

На вход приемного устройства системы одновременно с полезным сигналом поступают помехи от различных источников помех, наводимые в различных частях тракта передатчик — приемник сообщений и главным образом в канале связи. *Помехой называется стороннее возмущение, мешающее правильному приему сигналов.* Помехи могут нарушать нормальную работу системы: вызывать дополнительную погрешность телеизмерений или искажения при передаче сигналов телеуправления и телесигнализации.

Если передается аналоговый или дискретный сигнал $A(t)$, то на выходе канала связи в результате воздействия помех может быть принят сигнал, искаженный помехами:

$$x(t) = \mu(t)\, A(t) + \xi(t), \tag{4.13}$$

где $\mu(t)$ — мультипликативная помеха, $\xi(t)$ — аддитивная помеха.

Аддитивные помехи не зависят от сигнала и вызываются сторонним возмущением поля, с помощью которого передается сигнал по каналу связи (электрическим, электромагнитным, акустическим или др.).

Мультипликативные помехи обусловлены сторонним изменением коэффициента передачи канала связи. Они часто наблюдаются в коротковолновых радиолиниях, в которых называются замиранием (феддингом). Источником мультипликативных помех могут быть неудовлетворительно работающие системы АРУ в высокочастотных каналах связи. В промышленных системах мультипликативные помехи в большинстве случаев для хорошо выполненных каналов связи имеют

второстепенное значение. В связи с этим в дальнейшем будем рассматривать только аддитивные помехи.

По происхождению помехи в канале связи разделяются на две большие группы: атмосферные и индустриальные. Кроме того, в метровом диапазоне радиоволн и более коротких существенное значение имеет космический шум, возникающий в результате излучения электромагнитных волн солнцем, звездами и другими космическими объектами.

На коротких, средних и длинных волнах атмосферные помехи возникают главным образом из-за разрядов молний во время гроз. На земном шаре одновременно происходят в среднем примерно 2000 гроз, создающих в каждую секунду около 100 молний. Помехи возникают не только от ближайших, местных гроз, но и от удаленных. Уровень таких помех зависит от условий распространения радиоволн, поэтому интенсивность атмосферных помех грозового происхождения относительно велика в диапазоне длинных, средних и коротких волн, где лучше условия распространения на большие расстояния. К источникам атмосферных помех относятся также небольшие разряды, возникающие при трении наэлектризованных частиц (снег, пыль) в атмосфере.

Индустриальные (промышленные) помехи создаются различными установками при искрении, разрядах и других электрических процессах, связанных с быстрыми изменениями тока. Одной из главных причин, вызывающих индустриальные помехи, являются коммутационные процессы, возникающие в контактах выключателей, в коллекторах электрических машин, в системах зажигания автомобилей, самолетов и т. п. Неэкранированные токонесущие провода и электрические сети служат для таких помех передающими (излучающими) антеннами, а линии связи — приемными антеннами. Чем ближе между собой находятся такие сети и чем меньше они экранированы, тем более высокий уровень помех.

На низких частотах большое значение имеют прямые наводки вследствие наличия общих цепей, индуктивных или емкостных связей (несовершенное заземление, экранировка и т. п.). К индустриальным относятся также помехи, возникающие при коронном и других электрических разрядах на линиях электропередачи высокого напряжения ВЛ. Эти помехи наиболее существенны для высокочастотных каналов ВЛ.

В многоканальных системах возникают специфические перекрестные помехи, обусловленные взаимными влияниями каналов из-за несовершенства аппаратуры (разделительных фильтров, коммутаторов и т. д.).

Все помехи, независимо от их происхождения, по форме разделяются на импульсные, флуктуационные и в виде

периодических или синусоидальных колебаний

Помеха называется **и м п у л ь с н о й**, если она состоит из коротких импульсов, следующих друг за другом через промежутки времени, при которых нестационарный процесс от одного импульса успевает закончиться до появления следующего импульса помехи. Это условие выполняется, если время нестационарного процесса $\tau_и$ меньше сред. него интервала между импульсами $T_{ср}$:

$$< T_{ср} \tag{4.14}$$

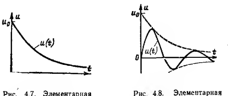


Рис. 4.7. Элементарная апериодическая помеха.

Рис. 4.8. Элементарная полупериодическая помеха.

Простейшей типичной формой элементарных импульсных помех является а п е р и о д и ч е с к а я п о м е х а (рис. 4.7), описываемая уравнениями

$$\left.\begin{aligned} u(t) &= 0 \text{ при } t < 0; \\ u(t) &= U_0 e^{-\alpha t} \text{ при } t \geqslant 0, \end{aligned}\right\} \tag{4.15}$$

и п о л у п е р и о д и ч е с к а я п о м е х а (рис. 4.8), для которой

$$\left.\begin{aligned} u(t) &= 0 \text{ при } t < 0; \\ u(t) &= U_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t \text{ при } t \geqslant 0, \end{aligned}\right\} \tag{4.16}$$

Спектры частот апериодической и полупериодической помех приведены на рис. 4.9. Апериодическая помеха возникает при воздействии короткого импульса на апериодическую RC- или RL-цепь, а полупериодическая — при воздействии на колебательную RLC-цепь.

Реальные импульсные помехи — это сумма многих различных простейших (периодических и апериодических) помех, обычно имеющих случайные амплитуду, длительность и моменты возникновения импульсов. Форма простейших импульсов, как правило, более сложная, чем форма рассмотренных импульсов.

Флуктуационные помехи в отличие от импульсных имеют форму хаотически изменяющегося непрерывного колебания (рис. 4.10). Для флуктуационных помех характерно отсутствие выбросов, отли-

чающихся от среднего уровня больше чем в 3—4 раза и справедливо соотношение (4.17):

$$\tau_{н} \geqslant T_{ср}. \qquad (4.17)$$

Это вызвано тем, что нестационарный процесс от каждого первичного импульса помех не успевает закончиться, как возникает новый импульс помех и т. д.

Характер импульсных и флутуационных помех зависит не только от источников помех, но и от длительности нестационарного процесса системы. При одних и тех же источниках на выходе устройства помехи могут быть импульсными или флуктуационными в зависимости от

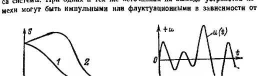


Рис. 4.9. Спектры частот элементарных апериодической (1) и полупериодической (2) помех

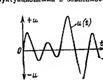


Рис. 4.10. Флуктуационная помеха.

длительности нестационарного процесса $\tau_{н}$, которая обратно пропорциональна полосе пропускания Δf данного устройства (например, входного фильтра):

$$\tau_{н} = k/\Delta f. \qquad (4.18)$$

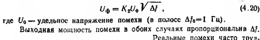
Для простейших избирательных устройств $k \approx 1$.

Так, если от источников возникают помехи в виде случайных коротких импульсов со средним интервалом между ними 5 мс, то помехи будут импульсными для приемника с полосой пропускания входного устройства $\Delta f = 1$ кГц (с длительностью нестационарного процесса $\tau_{н} \approx 1/\Delta f = 1$ мс). Эти же помехи на выходе будут иметь флуктуационный характер для входного устройства с полосой $\Delta f = 25$ Гц и длительностью нестационарного процесса $\tau_{н} = 1/\Delta f = 40$ мс. При определенных условиях помехи на входе устройства часто имеют импульсный характер, а на его выходе — флуктуационный.

Известно, что для линейных устройств выходной уровень импульсных помех $U_{и}$ пропорционален полосе пропускания устройства Δf:

$$U_{и} = K_1 U_{вх} \Delta f, \qquad (4.19)$$

где $U_{\text{вх}}$ — амплитуда импульсов помехи на входе фильтра, при этом выходной уровень флуктуационных помех



$$U_{\text{ф}} = K_2 U_0 \sqrt{\Delta f}\,, \tag{4.20}$$

где U_0 — удельное напряжение помехи (в полосе $\Delta f_0 = 1$ Гц).

Выходная мощность помехи в обоих случаях пропорциональна Δf.

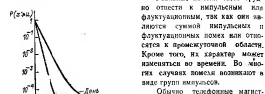


Рис. 4.11. Вероятности распределения импульсных помех по амплитуде в зависимости от уровня помехи днем и ночью.

Реальные помехи часто трудно отнести к импульсным или флуктуационным, так как они являются суммой импульсных и флуктуационных помех или относятся к промежуточной области. Кроме того, их характер может изменяться во времени. Во многих случаях помехи возникают в виде групп импульсов.

Обычно телефонные магистральные каналы по рекомендации МККТТ [60] оцениваются относительным временем превышения импульсной помехи порогового уровня $P(x \geqslant u)$. Для каналов длиной 2500 км превышение такой помехой порогов 0,6; 0,4 и 0,2 В в точке относительного уровня +4 дБ допустимо с вероятностью не более

$1 \cdot 10^{-5}$, $2 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-5}$

соответственно за часовые отрезки измерения. В связи с увеличением вероятности помех пропорционально длине канала связи для другой длины канала (в километрах) это значение необходимо умножать на $l/2500$ [3].

На рис. 4.11 в качестве примера приведены вероятности распределения импульсных помех по амплитуде в одном из магистральных высокочастотных телефонных каналов днем и ночью. Как видно из рисунка, импульсные помехи в дневное время несколько превышают нормированные значения, что вызвано существующей организацией эксплуатации каналов.

Источники помех обычно распределены в пространстве или по длине канала связи, т. е. находятся на различных расстояниях от приемника, а так как затухание, вносимое каналом связи, возрастает с увеличением расстояния и изменяется с частотой, то спектральная плотность помех в каждой точке пространства, а также характер помех зависят не только от параметров источников помех, но и от частотной

характеристики канала. В связи с этим, например, уровень атмосферных помех в области коротких радиоволн может возрастать с частотой вследствие улучшения условий распространения.

Спектральная плотность реальных помех для всех проводных каналов уменьшается с частотой как из-за уменьшения с частотой энергии помех, так и вследствие возрастания затухания на более высоких

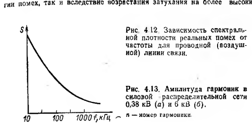
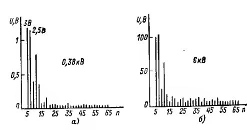


Рис. 4.12. Зависимость спектральной плотности реальных помех от частоты для проводной (воздушной) линии связи.

Рис. 4.13. Амплитуда гармоник в силовой распределительной сети 0,38 кВ (*а*) и 6 кВ (*б*).

n — номер гармоники.



частотах для источников помех, удаленных от приемника. Пример изменения спектральной плотности реальных помех от частоты для проводных каналов связи дан на рис. 4.12.

Синусоидальные помехи возникают от посторонних генераторов периодических колебаний, основная частота, гармоники или комбинационные частоты которых расположены в рабочем диапазоне частот. На рис. 4.13 приведен уровень помех в силовой сети 0,38 и 6 кВ за счет гармонических составляющих частоты 50 Гц. Здесь *n* — номер гармоники от частоты 50 Гц. Как отмечалось ранее, уровень и характер помех изменяются в широких пределах в зависимости от применяемых каналов связи. Относительно высокий уровень помех наблюда-

ется в радиоканалах на длинных, средних и коротких волнах, в линиях электропередачи и особенно в распределительных силовых сетях 0,38 – 6 кВ при использовании их в качестве каналов связи.

Для выделенных симметричных проводных линий (кабельных и воздушных) протяженностью примерно до 50 км при рабочей полосе частот порядка нескольких килогерц помехи существенного значения не имеют, так как легко реализуемы уровни сигнала во много раз превышают уровень помех. На линиях электропередачи уровень помех в каналах телемеханики зависит от потенциала на проводах, условий погоды и местных факторов.

Для радиоканалов в диапазоне длинных, средних и коротких волн уровень помех может изменяться в широких пределах в зависимости от времени суток, года, местных условий и т. п. В больших пределах изменяется уровень помех и в распределительных силовых сетях, используемых как каналы телемеханики.

Кроме помех, возникающих в канале связи, в тракте передатчик — приемник могут возникнуть аппаратурные помехи, т. е. помехи вследствие нарушений работы различных элементов аппаратуры, например электронных ламп, конденсаторов, резисторов и т. п. Собственные шумы передатчика и приемника и радиоканала на ультракоротких волнах имеют характер флуктуационных помех. Они вызываются тепловыми шумами, шумами, обусловленными дробовым эффектом в электронных лампах, шумами от нелинейных переходов в различных частях аппаратуры и атмосферными. Из-за сравнительно небольшого уровня все эти шумы проявляются при больших усилениях сигнала. Высокий удельный вес часто имеет тепловой шум. Эффективное напряжение теплового шума, создаваемое резистором R в полосе частот Δf(Гц),

$$U_{\text{т.ш}} = \sqrt{4KT\Delta fR}\ , \tag{4.21}$$

где $K = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°С — постоянная Больцмана; $T = (300 - 273 + 27)$ K — абсолютная температура, при которой измеряются тепловые шумы.

В протяженных магистральных каналах связи (кабельных, воздушных, радиорелейных) с многими усилительными пунктами мощность помех возрастает с увеличением длины канала связи. Результирующее значение шумов в конце канала связи определяется по формуле

$$U_{\text{ш}} = U_{\text{ш}1}\sqrt{K}\ , \tag{4.22}$$

где $U_{\text{ш}1}$ — напряжение шума, создаваемого на одном участке; K — число однаковых усилительных (приемных) участков.

В каналах тонального телеграфа, телефонных и других каналах магистральной связи наибольшее влияние имеют импульсные помехи нестационарного характера и помехи в виде пачек импульсов, ори

этом в некоторые интервалы времени наблюдается резкое увеличение интенсивности помех.

Коэффициент ошибок (отношение неправильных знаков ко всем переданным знакам) из-за импульсных помех при телеграфной передаче и хорошем состоянии канала составляет примерно $3\cdot10^{-5}$. Для скорости передачи 50 Бод (телеграфный канал) это составляет одну ошибку за 2 ч.

В телеграфных каналах, особенно при недостаточно высоком уровне их эксплуатации, в отдельные промежутки времени наблюдается резкое увеличение интенсивности помех и появление так называемых групповых импульсных помех в виде пачек ошибок длиной l. Увеличение интенсивности помех бывает днем в конце и начале рабочих смен и связано с переключениями и регулировкой обслуживающим персоналом аппаратуры. Наибольшая интенсивность помех имеет место в каналах, заходящих в узлы связи (кроссы). Увеличение групповых ошибок обычно связано с недостаточно хорошо постановленной эксплуатацией канала связи. В реальных каналах они имеют существенное значение.

Длина пачки l в первом приближении подчинена геометрическому закону распределения:

$$P_l = P_1(1 - P_1)^{l-1}, \qquad (4.22)$$

где P_1—вероятность появления пачки единичной длины ($l=1$). Для телефонных каналов средняя длина пачки ошибок $l_{ср}=8\div30$ знаков. Причинами резкого возрастания групповых ошибок могут быть перегрузка линейных усилителей, дребезг коммутационных контактов, пропадание несущей частоты, переключение канала с основного на резервный, переключение источников питания и т. п.

4.6. БОРЬБА С ИНДУСТРИАЛЬНЫМИ ПОМЕХАМИ

Индустриальные (промышленные) помехи имеют главным образом импульсный характер с максимальным спектром частот от долей герца до сотен мегагерц. Как отмечалось ранее, первичными источниками индустриальных помех являются искра при коммутационных процессах, электрическая дуга на высокочастотных линиях или наводки от высокочастотных установок при периодическом характере помех.

К наиболее мощным источникам помех относятся электрифицированный транспорт (электропоезда, трамваи, троллейбусы), линии высокого напряжения, промышленные генераторы высокой частоты, радиопередатчики и крупные силовые установки.

Так, импульсные токи включения, выключения и короткого замыкания в цепях двигателей главного привода на металлургическом заводе достигают сотен тысяч ампер. При этом на выходе даже хорошо

экранированных электрических кабелей связи и автоматики амплитуда импульсных помех в цехе достигает десятков вольт. Примерно такой же уровень помех наблюдается между разнесенными точками земли вблизи проходящего электропоезда. В аварийных условиях уровень помех увеличивается в десятки раз.

Необходимо обратить внимание на возрастающую актуальность борьбы с индустриальными помехами в связи со следующими взаимно противоречивыми процессами. С одной стороны, с развитием индустриализации уровень промышленных помех неуклонно возрастает, а с другой стороны, современные интегральные микроэлектронные технические средства допускают все меньший уровень помех по абсолютному значению. Поэтому уже сейчас аппаратура ЭВМ и автоматики, построенная на основе интегральных микросхем, не может работать в металлургических и многих других цехах из-за высокого уровня помех. Ее выносят за сотни метров в специализированные помещения.

Индустриальные помехи проникают в аппаратуру автоматики, ЭВМ и измерительной техники в основном двумя путями: 1) через входные и выходные цепи питания; 2) через наводки электростатических, магнитных и электромагнитных полей непосредственно на внутренние цепи аппаратуры.

Для борьбы с внешними помехами (через входные цепи, выходные и питания) применяют электромагнитные экраны, экранированные кабели, входные фильтры и специальные схемы, ослабляющие *уровень помех.*

Экранированные кабели применяются как в токонесущих силовых цепях с целью уменьшения интенсивности внешних помех от их источника, так и в слаботочных цепях автоматики и связи для уменьшения наводок в слаботочных кабелях при заданном уровне внешних помех.

Фильтры на входе аппаратуры могут включаться во всех входных цепях, выходных и питания. Для цепей питания и других цепей, где сигнал отсутствует, включаются фильтры, не пропускающие спектр помех. В отличие от этого для сигнальных цепей необходимо включать фильтры, пропускающие сигнал и не пропускающие помехи. Это затрудняет борьбу с помехами, если спектры частот сигналов и помех взаимно перекрываются по частоте.

Фильтры низких частот, подавляющие помехи, должны включаться во всех искрообразующих контактах электровозов, трамвая, троллейбуса, цепей зажигания двигателей внутреннего сгорания, коллекторов двигателей постоянного тока для уменьшения уровня внешних помех, наводимых источником помех. К специальным схемам, ослабляющим уровень помех, относятся схемы, симметрирующие цепи, на которые могут наводиться помехи.

Для устранения таких помех в воздушных линиях связи применяют скрещивание проводов через определенное число пролетов линии, а в кабельных линиях связи и автоматики — симметричные скрученные пары жил кабеля и симметрирующие переходные трансформаторы с электростатическим экраном между обмотками. Рассимметрирование цепей приводит к проникновению помех в приемные цепи. Отметим, что в специально симметрируемых цепях устройств связи асимметрия составляет 0,5—0,1 %, а в цепях без специального симметрирования — около 10 %, т. е. симметрирование цепей понижает уровень помех в 20—100 раз.

К специальным схемам симметрирования и понижения уровня помех относятся **оптронные развязки**. Из большого разнообразия оптронных развязок приведем пример развязки в виде пары светодиод — фотодиод, устраняющий электрическую связи между цепями. Промышленность выпускает разнообразные технические средства оптоэлектроники, позволяющие образовать оптронные пары с коэффициентом передачи, близким к 1. Такие развязки позволяют наиболее эффективно развязать электрические цепи, резко уменьшить проникновение помех и начинают широко применяться для борьбы с помехами.

Из самых разнообразных видов связей между источниками и приемниками помех необходимо выделить следующие две:

1) через открытые токонесущие провода источников помех, являющиеся передающими антеннами, излучающими электромагнитную энергию помех, и открытые провода информационных систем, являющиеся приемными антеннами, принимающими помехи, причем уровень помех возрастает с уменьшением расстояния между этими антеннами и во многих случаях — с увеличением их длины;

2) прямые наводки из-за наличия общих цепей, вызванных несовершенством заземления, емкостных и магнитных связей

Для устранения наводок от электростатических, магнитных и электромагнитных полей непосредственно на внутренние цепи аппаратуры применяются электрические, магнитные и электромагнитные экраны соответственно. Так, для устранения влияния силовых магнитных полей применяются экраны из пермаллоя, в ряде случаев двухступенчатые (двойные), а для устранения электростатических полей достаточно иметь экран в виде металлической сетки. Широко применяются универсальные электромагнитные экраны в виде медного кожуха без щелей.

Кроме перечисленных способов борьбы с промышленными помехами применяется включение во входных цепях разрядников, например, использующих эффект Зеннера для подавления импульсных помех высокого уровня. К эффективным методам борьбы с импульсными помехами относится помехоустойчивые коды с обнаружением, а в ряде случаев и с исправлением ошибок, рассмотренные в гл. 3 и 5.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

5.1. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛАХ

Рассмотрим вначале влияние флуктуационных помех. Результат воздействия помех зависит от уровня и характера помех, от способа передачи и параметров сигналов (вида и параметров модуляции, метода кодирования, уровня и спектра сигналов), а также и от способа приема сигналов.

Помехоустойчивостью называется способность системы противостоять вредному воздействию помех.

Как было сказано в гл. 4, флуктуационные помехи преобладают в радиоканалах, высокочастотных каналах на ВЛ, в каналах по распределительным силовым сетям и в волоконно-оптических.

Различают потенциальную помехоустойчивость метода передачи и реальную помехоустойчивость системы передачи и приема. При потенциальной помехоустойчивости оценивается воздействие помех при оптимальном способе приема для данного метода передачи. Реальная помехоустойчивость — это помехоустойчивость с учетом работы реального приемника, который может быть и неоптимальным. Такое разделение позволяет сравнить и выбрать сначала наиболее эффективный метод передачи и приема, а уже затем разработать рациональное схемное решение.

Для оценки помехоустойчивости методов передачи В. А. Котельников разработал теорию потенциальной помехоустойчивости, в которой показал, что при приеме сигнала с флуктуационными помехами принципиально существует наилучший приемник, названный им идеальным, который имеет потенциальную (наибольшую) помехоустойчивость для каждого метода передачи.

Потенциальная помехоустойчивость характеризует предельные возможности метода, позволяет объективно сравнить различные методы. Зная потенциальную помехоустойчивость, можно оценить, насколько реальный приемник приближается к идеальному. Заметим, что во многих случаях удается создать приемники, отличающиеся незначительно или не отличающиеся по помехоустойчивости от идеальных.

В идеальном приемнике принятый сигнал, искаженный помехами, сравнивается с неискаженным образцовым сигналом, выделяется разностный сигнал и принятый сигнал относится к тому образцовому, для которого энергия разности минимальна.

При передаче двухпозиционными кодами, когда может быть передан только один из двух элементарных сигналов 1 или 0, в идеальном приемнике Котельникова вычисляются интегралы

$$\Delta I_1 = \int_0^T [x(t) - A_1(t)]^2 \, dt; \tag{5.1}$$

$$\Delta I_2 = \int_0^T [x(t) - A_2(t)]^2 \, dt, \tag{5.2}$$

где $A_1(t)$, $A_2(t)$ — функции, соответствующие образцовым сигналам при приеме 1 и 0; $x(t)$ — принимаемый сигнал.

В приемнике принятый сигнал относится к тому образцовому, для которого ΔI минимальна.

Методы повышения помехоустойчивости дискретных сигналов разделяются на четыре основные группы:

1) параметрические, основанные на повышении помехоустойчивости элемента сигнала (0,1) путем выбора метода модуляции и коррекции импульсов;

2) основанные на применении избыточных, корректирующих кодов, т. е. кодов, использующих не все возможные комбинации;

3) использующие избыточность передаваемых сообщений (повторение передач, мажоритарные и др.);

4) использующие обратный канал связи.

Выбор параметрических методов повышения помехоустойчивости элементов сигнала (0 и 1) при флуктуационных помехах производится в соответствии с данными на рис. 5.1, а коррекция импульсов осуществляется в модемах и описана в § 9.4.

Спектр видеоимпульсов начинается от нуля. При передаче сигналов двухпозиционными кодами по каналу связи с переходными трансформаторами и конденсаторами, когда нижняя частота пропускания канала равна нескольким сотням герц и более, применяют один из видов модуляции. Если осуществляется модуляция синусоидальных колебаний, то применяют АМ, ЧМ или ФМ. На рис. 5.1 приведены

расчетные зависимости вероятности искажения элемента сигнала (0 или 1) P_1 от квадрата приведенного отношения сигнал/помеха [15]. Здесь $\alpha^2 = E_c^2/\sigma^2$, где E_c^2 — удельная энергия сигнала, а σ^2 — спектральная плотность мощности флуктуационной помехи (в полосе 1 Гц). Дискретная передача (рис. 5.1) производится двухпозиционным кодом, поэтому первичной модуляцией всегда будет кодо-импульсная

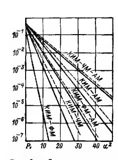


Рис 5.1. Зависимость вероятности искажения элемента сигнала P_1 от квадрата приведенного отношения сигнал/помеха.

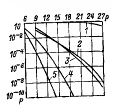


Рис. 5.2. Зависимость вероятности искажения P от $\rho = U_m\sqrt{T/\sigma^2}$ для различных кодов при числе передаваемых команд $N=32$.

1 — распределительный временной код: C_n^1; 2 — двоичный код на все сочетания; 3 — код Хемминга; 4 — последовательный частотный код на размещение двух из n частот A_n^2; 5 — частотный код с передачей одной из n частот — C_n^1

модуляция (КИМ) с элементами сигнала 0 и 1, часто называемая также манипуляцией. При этом модулируемой функцией является постоянный ток.

Из рис. 5.1 следует, что наибольшую помехоустойчивость имеет двойная модуляция КИМ—ФМ с вторичной фазовой модуляцией. Здесь фазовая модуляция (манипуляция) осуществляется на 180° и сигналы 0 и 1 при ФМ ($+A\sin\omega t$; $-A\sin\omega t$) отличаются друг от друга более чем в 2 раза по сравнению с амплитудной модуляцией (0 и $A\sin\omega t$). Этим упрощенно и объясняется более высокая помехоустойчивость ФМ. Однако при фазовой модуляции необходима высокая стабильность частоты и фазы, которая достигается кварцевой стабилизацией и автоподстройкой фазы.

При когерентном приеме частота и фаза принимаются

абсолютно стабильными, а при некогерентном (пунктирные линии) фаза относится к несущественным параметрам.

Важным результатом развития методов второй группы, связанных с выбором избыточных кодов, явилось использование кодов с большим числом частотных признаков для повышения помехоустойчивости при флуктуационных помехах. Наивысшей помехоустойчивостью при этом обладает код с одновременно передаваемой одной частотой на сочетание C_N^1, где N — число частот, равное числу сообщений.

Высокая помехоустойчивость кодов с передачей частот физически обусловлена возможностью при заданной амплитуде и длительности сигнала получить большую энергию каждого элементарного сигнала (импульса) за счет малого числа импульсов в одной комбинации. Это резко уменьшает вероятность их искажения. Такие коды при флуктуационных помехах по помехоустойчивости превосходят многие последовательные двухпозиционные с исправлением ошибок. Это объясняется тем, что при флуктуационных помехах помехоустойчивость в более сильной степени зависит от увеличения энергии сигнала, чем от увеличения корректирующих свойств кода.

На рис. 5.2 приведена зависимость вероятности искажения P одного сообщения (кодовой комбинации) от величины $\rho = V_m \sqrt{T}/\sigma^2$ для различных кодов, где V_m — амплитуда сигнала в полосе $\Delta f = 1/\tau$; σ^2 — спектральная плотность мощности флуктуационной помехи (в полосе $\Delta f = 1$ Гц); T — длительность кодовой комбинации. Из этого рисунка следует, что коды с передачей частот имеют более высокую помехоустойчивость при флуктуационных помехах, чем двоичный код Хемминга с исправлением одной ошибки.

В таких кодах при приеме двухпозиционных элементов сигналов (0 и 1) на каждой из частот возможно обнаружение ошибок, например, путем защиты по числу одновременно принимаемых частот. Такие защиты позволяют уменьшить вероятность образования ложной команды по сравнению с вероятностью подавления команды.

Высокая помехоустойчивость кодов с передачей частот при флуктуационных помехах дается ценой уменьшения эффективности передачи, что всегда имеет место для кодов, использующих для передачи часть всех возможных комбинаций. В кодах, использующих n временных позиций и k частот, максимальное число комбинаций равно 2^{nk}. В кодах на сочетание и размещение частот используется очень малая часть всех возможных комбинаций.

Методы обратного канала рассмотрены в § 3.5. В телеуправлении применяются следующие методы использования обратного канала:

1) безадресное квитирование: по обратному каналу при приеме сообщения передается общий сигнал для всех объектов — сигнал подтверждения приема сообщения;

2) адресное квитирование: по обратному каналу при приеме сообщения передается адрес объекта, принявшего сообщение, и повторяется само сообщение;

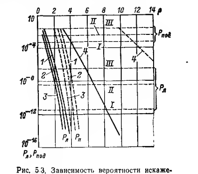


Рис. 5.3. Зависимость вероятности искажения P команды от $\rho = U_m \sqrt{T}/\sigma^2$.

3) квитирование с разрешением исполнения: в прямом канале с передающего устройства сначала передаются адрес и команда; в приемнике команда запоминается и по обратному каналу повторяется принятый сигнал. Если он совпадает с переданным, то с передающего пункта посылается сигнал разрешения исполнения.

Операцией квитирования (от слова «квитанция») *принято называть прием сигнала, подтверждающего принятый сигнал.* На рис. 5.3 приведены зависимости вероятности искажения команды от обобщенного параметра ρ для некоторых методов передачи, применяемых в промышленных системах телеуправления. Зависимости построены для передачи за время $2T$ одной из тысячи команд ($N = 1000$).

Сплошные линии на рис. 5.3 соответствуют вероятности возникновения ложной команды $P_л$, а пунктирные — вероятности подавления команды $P_{под}$ для следующих кодов (римскими цифрами обозначены категории помехоустойчивости).

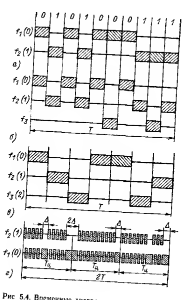


Рис 5.4. Временные диаграммы кодовых сигналов.

1. Двоичный 10-разрядный код (кривые *1*) на все сочетания $n=10$ ($N \approx 2^{10}$). Элементарные сигналы различаются частотами f_1 и f_2 (рис. 5.4, *а*). Для повышения помехоустойчивости такая же комбинация передается по обратному каналу на частотах f_3 и f_4. Если команды, переданные туда и

обратно, не совпадают, посылается отмена команды. Общее время передачи туда и обратно $2T$.

2. Десятиразрядный сменно-качественный код (кривая *2*). Он отличается от двоичного тем, что если 0 или 1 занимают подряд несколько временных позиций (рис. 5.4, *б*), то импульсы передаются на разделительной третьей частоте f_3.

3. Троичный 7-разрядный код (рис. 5.4, *в*) на все сочетания ($N=3^7\approx 1000$). Здесь уменьшение числа временных позиций с 10 до 7 позволяет в 10/7 раз увеличить длительность импульсов при одном и том же времени $2T$ для передачи кода с квитированием.

4. Единично-десятичный код с тремя десятичными разрядами (рис. 5.4, *г*), передаваемыми каждый число-импульсным последовательным кодом ($N=10^3=1000$). Сигналы передаются на двух частотах: f_1 и f_2. Цифра каждого десятичного разряда передается равным ей числом импульсов на частоте f_2, затем передается интервал Δ и далее дополняющее до 10 число импульсов на той же частоте f_2. На частоте f_1 осуществляется негативная передача. Время передачи десятичного разряда равно $T_п$. Так, цифра 4 ($a=4$) передается четырьмя импульсами и после интервала продолжительностью Δ следуют шесть импульсов на той же частоте f_2. Такой код передается без квитирования, поэтому на рис. 5.4, *г* время передачи команды в одном направлении принято $2T$.

Как видно из рис. 5.3, наибольшую помехоустойчивость при флуктуационных помехах имеет троичный код (кривые *3*) и наименьшую — число-импульсный десятичный (кривые *4*). Более высокая помехоустойчивость троичного кода объясняется относительным увеличением энергии одного элементарного сигнала и соответствующим уменьшением вероятности его искажения. При переходе к коду с большим числом частот можно получить еще большее повышение помехоустойчивости при заданной амплитуде, полосе частот и длительности сигнала. Все это справедливо только при флуктуационных помехах. Применение кодов с обнаружением ошибок в сочетании с обратным каналом позволяет достигнуть высокой помехоустойчивости передачи.

Коды с основанием $m>2$ в ряде случаев могут обеспечить более высокую помехоустойчивость, и поэтому для таких кодов, в том числе корректирующих, разработаны сравнительно простые схемы их реализации и они начинают

Вероятностные характеристики	Вероятности для устройств трех категорий		
	I	II	III
Вероятность трансформации переданной команды телеуправления	10^{-13}	10^{-10}	10^{-7}
Вероятность трансформации или потери переданного телесигнала при спорадической передаче (при повторении передачи до 3 раз)	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
Вероятность отказа исполнения посланной команды (при повторении передачи до 3 раз)	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
Вероятность необнаружения ошибки при передаче буквенно-цифровой информации (на знак)	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}
Вероятность возникновения одного ложного телесигнала в год при отсутствии передачи	$2\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-1}$

применяться в нетиповых системах передачи информации.

В табл. 5.1 приведены данные ГОСТ 16521-74, регламентирующего помехоустойчивость систем телемеханики, которые разделены на три категории. В ГОСТ приведены данные, относящиеся как к флуктуационным, так и импульсным помехам. Эти данные приведены для вероятности искажения элементарной посылки не более 10^{-5} (при этом устройства ТУ, ТС, ПД должны выполнять заданные функции).

Высокие требования ГОСТ по помехоустойчивости выполняются путем применения всех четырех или нескольких из перечисленных методов повышения помехоустойчивости, которые в основном независимы.

Рассмотрим в о з д е й с т в и е и м п у л ь с н ы х п о м е х. Помехоустойчивость устройств существенно зависит от характера помех. Для одиночных импульсных помех разработан ряд простых и эффективных методов борьбы. К ним относятся методы ШОУ (широкая полоса — ограничитель — узкая полоса), селекции импульсов по длительности, компенсация помехи и др. Воздействие импульсных помех может быть резко уменьшено путем применения корректирующих кодов, рассмотренных в гл. 3, и методов обратного канала. Рассмотрим некоторые методы борьбы с импульсными помехами.

Метод ШОУ эффективен при борьбе с одиночными импульсными помехами, длительность которых значительно меньше длительности элемента сигнала, при этом амплитуда импульсов помехи на входе может превышать амплитуду сигнала. Структурная схема устройства, работающего по методу *ШОУ*, приведена на рис. 5.5, *а* и состоит из широкополосного линейного усилителя, ограничителя по амплитуде и узкополосного усилителя, имеющего полосу частот, достаточную для пропускания сигнала и резко недостаточную для пропускания широкополосной импульсной помехи. На вход ограничителя (рис. 5.5, *б*) подается сигнал, амплитуда которого не превышает порог ограничения. При этом амплитуда широкополосной импульсной помехи может во много раз превышать порог ограничения $U_{огр}$ ограничителя. После выходного узкополосного усилителя сигнал будет значительно больше помехи, так как узкополосный усилитель пропускает сигнал, не искажая его, и подавляет ограниченную по амплитуде широкополосную помеху, пропуская только небольшую часть ее энергии, соответствующей полосе выходного усилителя (рис. 5.5, *в*).

Рис. 5.5. Подавление импульсных помех по методу ШОУ.

а — структурная схема устройства; *б* — сигнал+помеха на входе ограничителя; *в* — сигнал+помеха на выходе устройства.

Метод ШОУ неприменим, если импульсные помехи следуют одна за другой так часто, что нестационарные процессы от них не успевают закончиться, т. е. неприменим для флуктуационных помех. Кроме того, длительность помехи должна быть заметно меньше длительности элементарного сигнала.

Метод селекции по длительности будет рассмотрен в следующем параграфе.

Перейдем к рассмотрению помехоустойчивости двухпозиционных кодов с алфавитом 0 и 1 при импульсных помехах и независимых ошибках. Двухпозиционные коды, как отмечалось ранее, проще реализуются, и на них рассчитаны каналы связи Министерства связи. Они представляют наибольший интерес для многих уст-

ройств и в первую очередь для устройств, работающих с вычислительными машинами. Выбор способа передачи для двухпозиционных кодов сводится к выбору способа комбинирования двух элементов сигнала, способу обнаружения и исправления ошибок.

Способ передачи элементов сигнала (0 и 1) в типовых телеграфных и телефонных каналах для дискретной информации обычно задан, при этом действие помех задается статистическими характеристиками потока искажений элементов сигнала, называемого потоком ошибок. Характеристики потока ошибок определяются на основе экспериментальных исследований реальных каналов связи.

В проводных телефонных и телеграфных каналах при расчетах обычно задается вероятность искажения элемента сигнала (0 и 1) как заданная вероятность переходов $P(0 \to 1)$, $P(0 \to 0)$, $P(1 \to 0)$ и $P(1 \to 1)$. Для широко принятой симметричной модели канала $P(0 \to 1) = P(1 \to 0)$ и $P(0 \to 0) = P(1 \to 1)$. Вероятности $P(0 \to 1)$ и $P(0 \to 0)$ образуют полную группу несовместимых событий, поэтому $P(0 \to 1) + P(0 \to 0) = 1$.

Аналогично $P(1 \to 0)$ и $P(1 \to 1)$ есть группа несовместимых событий, тогда $P(1 \to 0) + P(1 \to 1) = 1$.

Для каналов связи (см. гл. 4) Министерства связи, заходящих в центры коммутации, имеют место групповые ошибки, которые характеризуются вероятностью хорошего и плохого состояний канала связи.

Для хорошего состояния симметричного канала задается

$$P(0 \to 1) = P(1 \to 0) = (10^{-5} - 10^{-3}) = P_1,$$

где P_1 — вероятность искажения элементарного символа (элемента сигнала), рассмотренная выше.

А для плохого состояния канала

$$P(0 \to 1) = P(1 \to 0) \approx 0{,}1 \div 0{,}5.$$

Симметричность канала во многих случаях поддерживается путем выбора порога ограничения на уровне 0,5 максимального значения сигнала. Повышение помехоустойчивости в рассматриваемых каналах до требуемого значения достигается путем выбора защищенного кода и способов передачи кода (см. гл. 3).

П о м е х о у с т о й ч и в о с т ь к о д о в определяется в д в у х р е ж и м а х: п е р е д а ч и кодовой комбинации и о ж и д а н и я, когда кодовые комбинации не передаются.

1. Для оценки искажений в режиме передачи кодовой комбинации используются следующие величины:

$P_{пр}$ — вероятность правильной передачи кодовой комбинации, т. е. правильной передачи сообщения;

$P_{тр}$ — вероятность перехода одной кодовой комбинации в другую информационную кодовую комбинацию, что соответствует переходу одного сообщения в другое, т. е. возникновению ложного сигнала;

$P_{под}$ — вероятность перехода информационной кодовой комбинации в нулевую или запрещенную (неинформационную) кодовую комбинацию, что эквивалентно подавлению передаваемого сообщения.

Все эти вероятности образуют полную группу несовместимых событий, поэтому

$$P_{пр} + P_{тр} + P_{под} = 1. \tag{5.3}$$

2. В режиме ожидания возможно только одно из двух событий: правильная передача сигнала об отсутствии сообщения с вероятностью $P'_{пр}$ и ложный прием информационных кодовых комбинаций с вероятностью $P_{л}$, поэтому

$$P'_{пр} + P_{л} = 1. \tag{5.4}$$

Определим вероятность перехода одной кодовой комбинации в другую из-за помех. Например, рассчитаем вероятность того, что при передаче комбинации 01110 будет принята комбинация 10111, считая искажения отдельных разрядов независимыми, а вероятности переходов элементов сигнала $P(1 \to 0)$, $P(0 \to 1)$ заданными.

Для искомого события должны произойти следующие элементарные события: в первом и пятом разрядах 0 переходит в 1, в третьем и четвертом 1 переходит в 1 и во втором 1 переходит в 0.

Вероятности $P(1 \to 0)$ и $P(1 \to 1)$ образуют полную группу несовместимых событий, поэтому $P(1 \to 1) = 1 - P(1 \to 0)$.

Вероятность искомого события равна произведению вероятностей элементарных событий, так как все они должны произойти совместно, поэтому

$$P(01110 \to 10111) = P(0 \to 1)\, P(1 \to 0)\, [1 - P(1 \to 0)] \times \times [1 - P(1 \to 0)]\, P(0 \to 1).$$

Для $P(0 \to 1) = P(1 \to 0) \ll 1$, что соответствует симметричному, хорошему состоянию канала, приближенно можно записать:

$$P(1 \to 1) = P(0 \to 0) \approx 1,$$

искомая вероятность перехода

$$P(01110 \to 10111) \approx P^3(0 \to 1).$$

В частном случае при $P(0 \to 1) = 10^{-3}$ получим:

$$P(01110 \to 10111) \approx P^3(0 \to 1) = 10^{-9}.$$

Для иллюстрации на примере разрешенных и неразрешенных кодовых комбинаций рассмотрим простейший защищенный распределительный код C_n^1, $n=3$. При приеме такого кода счетчик считает число импульсов в кодовой комбинации и, если число импульсов больше одного, он запрещает прием кодовой комбинации. Для $n=3$ число всех комбинаций равно $2^n=8$. Однако разрешенными при $n=3$ будут только три комбинации:

0 0 1

0 1 0

1 0 0

которым, например, соответствует передача одной из трех команд. Остальные пять комбинаций запрещены.

Определим обнаруженные и необнаруженные ошибки, если заданы состояние канала и вероятность искажения элемента кода P_1. Для упрощения задачи будем рассматривать симметричный канал и хорошее его состояние, т. е. $P_1 = P(0 \to 1) = P(1 \to 0) \ll 1$.

Допустим, что передается первая разрешенная комбинация 001. При решении таких задач необходимо рассмотреть все возможные комбинации. Здесь их $2^3=8$ Из них

0 0 1 — правильная передача;

0 1 0 }
1 0 0 } — необнаруженные ошибки;

0 1 1 }
1 1 1 }
1 0 1 } — обнаруженные ошибки, при которых происходит защитный отказ.
1 1 0 }
0 0 0. }

Вероятности необнаруженных ошибок в соответствии с приведенной ранее методикой равны:

$$P(001 \to 010) = P(1 \to 0)\, P(0 \to 1)\, P(0 \to 0) \approx P_1^2;$$

$$P(001 \to 100) = P(1 \to 0)\, P(0 \to 0)\, P(0 \to 1) \approx P_1^2.$$

Суммарная вероятность необнаруженных ошибок, равная вероятности трансформации в информационную комбинацию,

$$P_{\text{тр}} = P(001 \to 010) + P(001 \to 100) = 2P_1^2.$$

Соответственно вероятности обнаруженных ошибок равны:

$$P(001 \to 011) = P(1 \to 1)\, P(0 \to 1)\, P(0 \to 0) \approx P_1;$$

$$P(001 \to 111) = P(1 \to 1)\, P(0 \to 1)\, P(0 \to 1) \approx P_1^2;$$

$$P(001 \to 101) = P(1 \to 1)\, P(0 \to 0)\, P(0 \to 1) \approx P_1;$$

$$P(001 \to 110) = P(1 \to 0)\, P(0 \to 1)\, P(0 \to 1) \approx P_1^3;$$

$$P(001 \to 000) = P(1 \to 0)\, P(0 \to 0)\, P(0 \to 0) \approx P_1.$$

Суммарная вероятность всех обнаруженных ошибок равна вероятности подавления $P_{\text{под}}$:

$$P_{\text{под}} = 3P_1 + P_1^2 + P_1^3 \approx 3P_1.$$

В частном случае при $P_1 = 10^{-3}$ получим:

$$P_{\text{тр}} = 2P_1^2 = 2 \cdot 10^{-6}; \quad P_{\text{под}} \approx 3P_1 = 3 \cdot 10^{-3}.$$

Здесь, как и для других кодов, вероятность трансформации $P_{\text{тр}}$ в другую информационную комбинацию обычно на несколько десятичных порядков меньше вероятности подавления $P_{\text{под}}$.

В качестве другого примера определим границу сверху для вероятности возникновения необнаруженной ошибки в коде с обнаружением ошибок с длиной кодовой комбинации $n = 12$ и $d_{min} = 4$ для передачи по симметричному каналу с независимыми ошибками при вероятности одиночной ошибки $P_1 = 10^{-2}$ и числе разрешенных комбинаций $M = 2^6$.

1. Вероятность перехода одной разрешенной комбинации в другую для $P_1 \ll 1/n$, $d_{min} = 4$ и $n = 12$ меньше или равна $P_1^4(1 - P_1)^8$. Всего возможно $M - 1$ таких переходов.

2. Вероятность необнаруженной ошибки

$$P_{\text{н.о}} \leq (M - 1)\, P_1^4 (1 - P_1)^8 \approx 6{,}4 \cdot 10^{-7}.$$

Пусть число сообщений будет M, а число всех возможных комбинаций в коде N. Для избыточного кода $M < N$.

Информационные кодовые комбинации пронумеруем от 1 до M, а оставшиеся кодовые комбинации от $M + 1$ до N

будем называть неинформационными. Нулевой сигнал будет соответствовать отсутствию сообщения. Тогда вероятность правильной передачи любой кодовой комбинации из n символов некорректирующего кода

$$P_{\text{пр}} = (1 - P_1)^n. \qquad (5.5)$$

Средняя по всем комбинациям вероятность трансформации

$$\overline{P}_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^{N} P_i \sum_{j=1}^{N} \delta_{ij} P_{ij}, \qquad (5.6)$$

где

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } j = i; \\ 1 & \text{при } j \neq i; \end{cases}$$

P_{ij} — вероятность перехода i-й кодовой комбинации в j-ю.

Средняя вероятность подавления

$$\overline{P}_{\text{под}} = \sum_{i=1}^{M} P_i \left[\sum_{j=M+1}^{N} P_{ij} + P_{i0} \right], \qquad (5.7)$$

где P_{i0} — вероятность перехода i-й комбинации в нулевую.

Величина $P_{\text{под}}$ может быть также вычислена из (5.3) по формуле

$$\overline{P}_{\text{под}} = 1 - \overline{P}_{\text{тр}} - P_{\text{пр}}. \qquad (5.8)$$

Вероятность возникновения ложного сообщения в режиме ожидания

$$\overline{P}_{\text{л}} = \sum_{i=1}^{M} P_{0i}. \qquad (5.9)$$

Определим $P_{\text{тр}}$, $P_{\text{под}}$ и $P_{\text{л}}$ для некоторых кодов и способов передачи.

1. Код с двукратной передачей кодовой комбинации и защитой по идентичности каждой элементарной посылки ($D = 0{,}5$):

$$\left. \begin{aligned} n &= 2[\log_2 M] = 2n_0; \\ n_0 &= \{\log_2 M\}. \end{aligned} \right\} \qquad (5.10)$$

Здесь и далее квадратные скобки означают, что производится округление до ближайшего сверху целого числа, поэтому

$$P_{\text{пр}} = (1 - P_1)^{2n_0}. \qquad (5.11)$$

Трансформация происходит, если при первой и повторной передачах искажаются символы на одинаковых временных позициях, причем $P_{тр}$ одинакова для всех комбинаций:

$$\left.\begin{aligned} \overline{P}_{тр} &= \sum_{i=1}^{n_0} C_{n_0}^{i} P_1^{2i} \left(1 - P_1\right)^{2n_0 - 2i}; \\ \overline{P}_{под} &= 1 - P_{пр} - \overline{P}_{тр}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.12)$$

Вероятность ложной команды

$$P_{л} = \sum_{i=1}^{n_0} C_{2n_0}^{i} P_1^{2i} \left(1 - P_1\right)^{2n_0 - 2i}. \qquad (5.13)$$

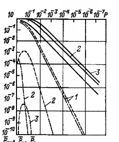


Рис. 5.6. Средние вероятности подавления $\overline{P}_{под}$ (сплошные линии), трансформации $\overline{P}_{тр}$ (пунктирные линии) и ложной команды $P_{л}$ (штрих-пунктирные линии) в зависимости от вероятности искажения элементарного сигнала P_1.

1 — двоичный код с защитой на четность; *2* — двоичный код с защитой на четность и зеркальным повторением; *3* — двоичный код с защитой на четность и двойным зеркальным повторением.

2. **Двоичный код с защитой на четность.** Для передачи M сообщений длина кода

$$n = [\log_2 M] + 1 = n_0 + 1.$$

Для этого кода

$$P_{пр} = (1 - P_1)^{n_0+1}; \quad \overline{P}_{1р} = \sum_{i+1}^{[n/2]} C_{n_0+1}^{2i} P_1^{2i} \left(1 - P_1\right)^{n_0+1-2i};$$

$$\overline{P}_{под} = 1 - \overline{P}_{тр} - P_{пр}. \qquad (5.14)$$

Из рис. 5.6 и приведенных формул следует, что вероятность подавления $P_{под}$ значительно больше вероятности трансформации $P_{тр}$ и вероятности ложного сигнала $P_{л}$. Вероятность $P_{под}$ есть вероятность возникновения обнаруженной ошибки. Обнаружение ошибки в системе с обратным ка-

налом используется для переспроса. Во время плохого состояния канала система может работать все время в режиме переспроса и не передает информации (образно выражаясь, «захлебывается»). Однако время пребывания канала в плохом состоянии в сотни и тысячи раз меньше среднего времени пребывания канала в хорошем состоянии, поэтому общая эффективность передачи остается высокой и канал приобретает адаптивные свойства к возникающим помехам.

Ошибки типа трансформации и возникновения ложного сигнала хуже. Они не обнаруживаются при приеме, поэтому необходимо выбирать коды с достаточно малыми $P_{тр}$ и $P_{л}$ так, чтобы вероятность необнаруженной ошибки была не более заданного значения вероятности искажений при любом состоянии канала. Это значение задается в технических требованиях, и выполнение его особенно важно для ответственных сигналов ТУ, ТС, ТИ и ПД.

Следует заметить, что для большинства кодов, например приведенных на рис. 5.6, максимум вероятностей $P_{тр\,max}$ и $P_{л\,max}$ имеет место при определенном состоянии канала, для которого $P_1 \approx 10^{-1}$. Значения $P_{тр\,max}$ и $P_{л\,max}$ в этом случае используются для сравнения кодов по минимаксному критерию. Выбирается код, у которого минимальные максимумы $P_{тр}$, $P_{л}$ имеют допустимое значение. С увеличением избыточности кода значения $P_{тр\,max}$ и $P_{л\,max}$ уменьшаются, в то время как для небольшой избыточности кода максимумы $P_{тр}$ и $P_{л}$ могут отсутствовать. Так, на рис. 5.6 нет максимумов $P_{тр}$ и $P_{л}$ у кода с защитой на четность при однократной передаче.

С применением минимаксного критерия код оценивается по наихудшей вероятности возникновения необнаруженной ошибки для всех возможных значений вероятности ошибки элементарного сигнала P_1. Отметим, что по минимаксному критерию ряд кодов имеет достаточно высокую помехоустойчивость. Для любой вероятности искажения элементарного сигнала P_1 эти коды обеспечивают малую вероятность необнаруженной ошибки. Такое свойство особенно ценно для систем с обратным каналом.

К кодам, помехоустойчивым по минимаксному критерию, относятся коды с n временными позициями на сочетание C_n^m с защитой по постоянному числу m, коды с прямым или зеркальным повторением и защитой по идентичности всех элементарных посылок, инверсный код, коды с комбинацией этих защит и др. Максимум вероятности необнару-

женной ошибки в этих кодах может быть уменьшен ценой увеличения избыточности кода D.

Вероятности ошибок для кодов с избыточностью, приведенные на рис. 5.6, определены при следующих ограничениях:

1) рассматривается симметричный канал для передачи двухпозиционных сигналов, т. е. канал с равновероятными переходами $P(1\to 0) = P(0\to 1)$;

2) вероятность ошибки в течение длительности кодовой комбинации $P_t = \text{const}$;

3) синхронизация идеальная, т. е. приемник «знает» начало кодовой комбинации (передача синхроимпульсов не рассматривается);

4) ошибки в прямом и обратном каналах независимы, вероятности их возникновения одинаковы.

В магистральных проводных каналах, как отмечалось ранее, значительный удельный вес имеют групповые ошибки, при которых продолжительность плохого состояния канала связи может превышать продолжительность одной кодовой комбинации. Корректирующие коды с исправлением ошибок при групповых ошибках и наличии обратного канала в большинстве случаев нерациональны. Они приводят к необходимости иметь постоянную большую избыточность для исправления пачки ошибок, возникающих в плохом состоянии канала, так как при этом необходимо рассчитывать на худший случай. Вместе с тем постоянная высокая избыточность кода, рассчитанная на редко случающееся плохое состояние канала, не нужна для хорошего состояния канала, которое занимает большую часть времени (более 99 %). В результате средняя эффективность использования канала резко снижается.

Лучшие результаты при групповых ошибках дают методы обнаружения ошибок в сочетании с обратным каналом, используемым для запроса повторения передачи. Код при этом может иметь сравнительно небольшую среднюю избыточность, достаточную для обнаружения ошибки. Во время хорошего состояния канала сигналы передаются без переспроса, а при одиночных или групповых ошибках передача повторяется. Замедление средней скорости передачи сообщений в этом случае тем больше, чем хуже состояние канала, т. е. чем меньше его пропускная способность из-за помех. Следовательно, такой способ передачи обладает свойством адаптации — приспособления скорости передачи к состоянию канала связи.

5.2. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим сначала помехоустойчивость при передаче непрерывных сигналов и флуктуационных помехах, которая оценивается значениями приведенных к диапазону средней $\bar{\delta}$ и средней квадратической $\delta_{ск}$ погрешностей (понятия погрешностей даны в гл. 12):

$$\bar{\delta} = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int\limits_{\Delta} \Delta P(\Delta)\, d\Delta; \qquad (5.15)$$

$$\delta_{ск}^2 = \frac{1}{(\lambda_{max} - \lambda_{min})^2} \int\limits_{\Delta} (\Delta - \bar{\Delta})^2 P(\Delta)\, d\Delta, \qquad (5.16)$$

где Δ — абсолютное значение погрешности, равное разности переданного и принятого значений параметра $\lambda(t)$; $\bar{\Delta}$ — среднее значение абсолютной погрешности.

С увеличением уровня помех возрастает отношение $\bar{\Delta}/\delta_{ск}$. При слабых флуктуационных помехах значением средней погрешности по сравнению со значением средней квадратической погрешности можно пренебречь.

В. А. Котельниковым был разработан метод определения средней квадратической погрешности при передаче параметра λ с помощью сигнала $A(\lambda, t)$ в условиях оптимального приема при слабых флуктуационных помехах.

Согласно этому методу [26]

$$\delta_{ск}^2 = \frac{\sigma^2}{2\int\limits_0^T \left[\partial A(\lambda, t)/\partial\lambda\right]_{\lambda=\lambda_0}^2 dt}, \qquad (5.17)$$

где T_0 — время, затрачиваемое на передачу одного значения параметра λ; σ — удельная мощность помех.

Определим в качестве примера погрешность в системе с частотной модуляцией при передаче в течение интервала T_0 одного значения параметра λ. В этом случае

$$A(\lambda, t) = V_m \sin[2\pi(f_0 + f_д\lambda)t + \varphi_0],$$

где $f_д$ — девиация частоты; f_0 — несущая частота.

Производная

$$\partial A(\lambda, t)/\partial\lambda = V_m 2\pi f_д t \cos[2\pi(f_0 + f_д\lambda)t + \varphi_0].$$

Если $1/f_0 \ll T_0$, т. е. за время T_0 укладывается много периодов несущей частоты, то

$$\int_0^{T_0} [\partial A(\lambda, t)/\partial\lambda]^2 dt = 4\pi^2 f_д^2 V_m^2 \int_0^{T_0} t^2 dt + 4\pi^2 f_д^2 V_m^2 \int_0^{T_0} t^2 \cos 2[2\pi \times$$

$$\times (f_0 + f_д \lambda) t + \varphi_0] dt \approx 4\pi^2 f_д^2 V_m^2 T_0^3/G.$$

Используя (5.17), получаем:

$$\delta_{ЧМ} = \sqrt{3}\sigma/4\pi f_д V_m T_0^{3/2}. \quad (5.18)$$

Выразим $\delta_{ЧМ}$ через обобщенные параметры:

$$\left.\begin{aligned} \rho &= V_m \sqrt{T}/\sigma = V_m/\sigma \sqrt{2F_m}; \\ \gamma &= \Delta f T = \Delta f/2F_m, \end{aligned}\right\} \quad (5.19)$$

где F_m — высшая частота спектра передаваемой функции; Δf — полоса частот, занимаемая сигналом.

Для этого введем соотношение

$$T_0 = T/\eta_в, \quad (5.20)$$

где $\eta_в$ — коэффициент временного квантования, равный 3—20 в зависимости от допустимой погрешности временного квантования и способа интерполяции (см. гл. 1).

Полоса частот, занимаемая сигналом ЧМ (см. гл.1),

$$\Delta f_{ЧМ} \approx 2(f_д + F_m). \quad (5.21)$$

Используя (5.19) и (5.21), получаем:

$$f_д = F_m(\gamma - 1).$$

Выразив V_m через ρ, σ и F_m и использовав (5.20), получим:

$$\delta_{ЧМ} = \frac{\sqrt{3\eta_в^3}}{\pi} \frac{1}{\rho(\gamma - 1)}. \quad (5.22)$$

В системах с временным разделением каналов

$$T_0 = T_ц/N\eta_к, \quad (5.23)$$

где $T_ц$ — время цикла, связанное с наивысшей частотой передаваемого параметра F_m соотношением $T_ц = 1/KF_m$ ($K \geqslant 2$; обычно $K = 3 \div 10$); N — число каналов; $\eta_к$ — коэффициент использования канального времени.

Помехоустойчивость систем телеизмерения зависит от широкополосности используемого метода передачи. Для частотной и частотно-импульсной модуляции ошибка обратно пропорциональна полосе частот и соответственно девиации частоты. Для систем с время-импульсной (ВИМ) и

широтно-импульсной (ШИМ) модуляциями погрешность при ограниченной амплитуде сигнала обратно пропорциональна корню квадратному из полосы частот, занимаемой каналом.

В результате анализа помехоустойчивости можно сделать следующие выводы.

1. Для всех видов модуляции, кроме АМ, погрешность при слабых флуктуационных помехах может быть уменьшена путем выбора более широкополосного сигнала (больших значений γ).

В системах с частотной модуляцией увеличение γ достигается путем выбора больших значений девиации частоты, в системах с ВИМ и ШИМ — путем применения импульсов с меньшей длительностью фронта. При ограниченной амплитуде сигнала более эффективна по помехоустойчивости частотная модуляция, так как для нее ошибка обратно пропорциональна первой степени γ, в то время как для ВИМ и ШИМ она обратно пропорциональна корню квадратному из γ.

2. Временно́е разделение каналов обеспечивает при одном и том же способе модуляции более высокую помехоустойчивость, чем частотное разделение по несущим и тем более по поднесущим. Это физически объясняется тем, что при временно́м разделении между каналами делится время передачи, а при частотном—амплитуды сигналов. При этом энергия сигнала одного канала с ростом числа каналов во втором случае убывает быстрее.

3. Погрешность при слабых флуктуационных помехах для большинства видов модуляции (кроме АМ) уменьшается с расширением полосы, занимаемой сигналом, и соответствующим расширением полосы приемника. Такая зависимость объясняется тем, что полезный выходной сигнал обычно увеличивается прямо пропорционально широкополосности системы (например, прямо пропорционально девиации частоты), в то время как уровень помех растет пропорционально корню квадратному из полосы частот. Эта закономерность справедлива для слабых флуктуационных помех. С увеличением полосы частот приемника, начиная с некоторого значения, помехи становятся сильными. При сильных помехах погрешность возрастает с увеличением полосы частот, занимаемой сигналом.

Наиболее нагляден переход от слабых помех к сильным в системах с время-импульсной модуляцией (ВИМ, ФИМ). Действие слабых помех проявляется в таких системах в

смещении переднего фронта импульса за счет наложения помех на сигнал (рис. 5.7). Так как с увеличением полосы частот крутизна фронта растет быстрее, чем уровень помех, погрешность от помех сначала убывает с увеличением полосы, т. е. $\Delta f_2 > \Delta f_1$. Однако начиная с некоторого значения полосы пропускания появляются выбросы помех, превышающие пороговый уровень приемника. Эти ложные выбросы будут восприниматься приемником (если нет селектора по длительности) как полезные импульсы, в ре-

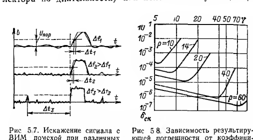


Рис 5.7. Искажение сигнала с ВИМ помехой при различных полосах пропускания приемника.

Рис 5.8 Зависимость результирующей погрешности от коэффициента широкополосности γ сигнала ВИМ при различных значениях параметра ρ.

зультате чего возникают большие (аномальные) погрешности при $\Delta f_3 > \Delta f_2$. Дальнейшее расширение полосы приведет к дальнейшему увеличению частоты появления ложных выбросов и росту погрешности от помех.

На рис. 5.8 приведены зависимости средней квадратической погрешности в системе с ВИМ от коэффициента широкополосности сигнала $\gamma = \Delta f T$ при постоянном значении параметра $\rho = V_m \sqrt{T}/\sigma$, характеризующие отношение мощности сигнала к удельной мощности шума. Аналогичные зависимости существуют и для других видов модуляции, кроме амплитудной. Как видно из рис. 5.8, с расширением полосы частот Δf (с увеличением $\gamma = \Delta f T$) при слабых помехах средняя квадратическая погрешность $\delta_{ск}$ сначала уменьшается, достигает минимума при каждом значении ρ и затем при сильных помехах возрастает.

Таким образом, при заданном отношении сигнал/поме-

ха для каждого вида модуляции существует оптимальная широкополосность сигнала, для которой существует наибольшая помехоустойчивость передачи. Это же значение широкополосности соответствует минимуму энергии сигнала при заданной погрешности передачи. Для одного и того же метода передачи оптимальная полоса зависит от требуемой точности передачи. Для систем ТИ с относительно большой погрешностью оптимальная полоса у́же, чем для более точных систем телеизмерений.

Очевидно, что различные методы передачи целесообразно сравнивать в условиях оптимальной для каждого метода широкополосности, что имеет большое практическое значение в первую очередь для каналов с большой избыточной полосой, а это характерно для систем ТИ. В системах ТИ спектры передаваемых сообщений занимают полосу частот порядка нескольких герц при реальной полосе пропускания канала более 100 Гц. Это вызвано тем, что из-за нестабильности несущей частоты или параметров фильтров в системах ТИ работают с полосой пропускания, значительно превышающей оптимальную.

В отличие от этого при передаче речи и других широкополосных сигналов полоса пропускания в связи выбирается значительно меньше оптимальной, что не позволяет реализовать потенциальные возможности метода. Выбор более узкой полосы частот объясняется в таких системах стремлением к более эффективному использованию дефицитной полосы частот канала связи. На рис. 5.9 изображены зависимости оптимальной широкополосности $\gamma_{опт}=\Delta fT/N$ и минимальной погрешности $\delta_{\Sigma\,min}$ от параметра $E_{mN}/\sigma\sqrt{N}$ для различных способов передачи, в том числе и дискретных (кодовых).

Для дискретных систем под погрешностью понимается суммарная погрешность от помех и квантования. Наличие оптимальной широкополосности дискретных методов модуляции (КИМ) объясняется тем, что с увеличением числа уровней квантования погрешность квантования уменьшается. Вместе с тем с увеличением числа уровней квантования растет число кодовых комбинаций в коде и соответственно разрядность кода. При заданной энергии, расходуемой на передачу одного значения параметра, увеличение разрядности кода вызывает уменьшение энергии элементов сигнала, что приводит к увеличению вероятности искажений. В результате возрастает и средняя квадратическая погрешность от помех.

Оптимальная широкополосность системы зависит от способа приема сигналов. Известные в настоящее время способы приема довольно хорошо реализуют потенциальную по-

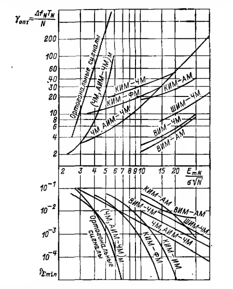


Рис. 5.9. Зависимость оптимальной широкополосности γ и суммарной погрешности от параметра $E_{mN}/\sigma\sqrt{N}$.

E_{mN} — максимальная энергия N-канального сигнала за такт; σ — удельное напряжение шума.

мехоустойчивость при слабых помехах. При сильных помехах помехоустойчивость реальных приемников часто существенно ниже предельно возможной. Для систем с частотной модуляцией помехоустойчивость может быть су-

щественно повышена путем применения многофильтрового метода приема [см. кривые (ЧМ, АИМ—ЧМ)$_м$ на рис. 5.9].

Помехоустойчивость систем с время-импульсной модуляцией при сильных помехах и ограничений амплитуде сигнала может быть повышена путем применения импульсов увеличенной длительности в сочетании с устройствами селекции по длительности. Ограничимся рассмотрением случая, когда могут возникать ложные и подавляться рабочие импульсы под воздействием выбросов нормальных флуктуационных помех. Будем считать, что на вход селектора подаются импульсы сигнала длительностью τ_0. Синхронизацию приемного и передающего устройств будем считать идеальной, а селектор не пропускающим импульсы длительностью $t<\tau_0$. Будем также считать, что селектор не пропускает импульс сигнала, если он раздроблен выбросом так, что его длительность на уровне порога стала менее τ_0.

Средняя квадратическая погрешность $\delta_{ВИМ}$ при время-импульсной модуляции и использовании селектора импульсов по длительности [26]

$$\delta_{ВИМ} = \sqrt{0{,}048\gamma(1-\varkappa_0/\gamma)\, e^{-1{,}05\varkappa_0^2} + 0{,}193\varkappa_0 e^{-\rho^2/8\gamma^2}}, \quad (5.24)$$

где $\gamma = T_ц\Delta F$ — коэффициент широкополосности сигнала; $T_ц$ — длительность цикла; ΔF — полоса пропускания приемного устройства, равная $1/2\tau_ф$; $\tau_ф$ — длительность фронта импульса сигнала; $\varkappa_0 = \tau\Delta F$ — коэффициент селекции, показывающий, во сколько раз селектируемый импульс длительностью τ_0 больше двойной длительности фронта $\tau_ф$ импульса сигнала; $\rho = V_m\sqrt{T_ц}/\sigma$ — обобщенный параметр, характеризующий энергетическое отношение сигнала к помехе.

На рис. 5.10 приведены зависимости средней квадратической погрешности ВИМ от коэффициента селекции, построенные по формуле (5.24) для нескольких значений γ. Из рис. 5.10 следует, что в области небольших $\varkappa_0$ при при γ=const и ρ=const с увеличением $\varkappa_0$ погрешность $\delta_{ВИМ}$ резко уменьшается. При $\varkappa=\varkappa_{опт}$ погрешность минимальна (δ_{min}). Участок кривых слева от δ_{min} определяется первым слагаемым в (5.24) и обусловлен погрешностью, возникающей из-за появления ложных импульсов, вероятность появления которых уменьшается с увеличением длительности τ_0. В дальнейшем с увеличением $\varkappa_0$ ($\varkappa_0>\varkappa_{опт}$) погрешность

$\delta_{\text{вим}}$ увеличивается из-за подавления и дробления импульса сигнала помехой.

Из рис. 5.10 следует, что для заданных γ и ρ существует оптимальный коэффициент селекции $\varkappa_{\text{опт}}$, а следовательно, есть оптимальная длительность импульса сигнала $\tau_{0\,\text{опт}} =$

Рис 5.10. Зависимость среднеквадратической погрешности $\delta_{\text{вим}}$ от коэффициента селекции $\varkappa_0$ при $\rho=40$ и различных γ.

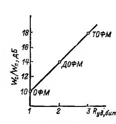


Рис. 5.11. Зависимость допустимого отношения мощности сигнала к мощности помехи $W_c/W_п$ в телефонном канале от удельной скорости передачи $R_{уд}$.

$= \varkappa_{\text{опт}}/\Delta F$, при которой погрешность $\delta_{\text{вим}}$ минимальна. Для реально используемых значений ρ и γ оптимальный коэффициент селекции изменяется от 3 до 5. Из рис. 5.10 также следует целесообразность применения селекции по длительности для повышения помехоустойчивости.

5.3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

Эффективность передачи сводится к передаче возможно большего количества информации через канал связи в единицу времени, т. е. к наибольшему использованию пропускной способности канала.

Предельная скорость передачи видеоимпульсов $R_в$ (Бод) в канале с полосой пропускания $\Delta F = 0 - F_m$

$$R_в = 2F_m,$$

а предельная скорость передачи радиоимпульсов с двухпозиционными сигналами 0 и 1 (амплитудная манипуля-

ция) в канале с полосой пропускания $\Delta F = F_2 - F_1$ и передачей двух боковых полос

$$R_в = \Delta F.$$

Реальные частотные характеристики телефонных каналов существенно отличаются от идеальных, поэтому скорость передачи радиоимпульсов практически уменьшается до

$$R_в = 0{,}7\Delta F.$$

Дальнейшее увеличение скорости передачи импульсов при заданной полосе пропускания канала связи требует увеличенного отношения сигнал/помеха и перехода от двухпозиционных сигналов к многопозиционным, например, путем применения двукратной и трехкратной амплитудной и фазовой модуляции вместо однократной. На рис. 5.11 приведена зависимость допустимого отношения мощности сигнала к мощности помехи $W_c/W_п$ в телефонном канале от удельной скорости передачи $R_{уд}$ в полосе частот 1 Гц при использовании однократной (ОФМ), двукратной (ДОФМ) и трехкратной (ТОФМ) фазовой модуляции.

При этом с увеличением удельной скорости передачи требуется не только увеличение отношения сигнал/помеха, но и коррекция амплитудных и фазовых характеристик канала [3].

Сравнение различных систем целесообразно производить по относительной скорости передачи R_F, равной отношению максимального количества информации I_{max}, которое может быть передано за время T, к произведению полосы частот ΔF и времени T:

$$R_F = \frac{I_{max}(T)}{\Delta F T} = \frac{\log_2 N}{T\Delta F}, \tag{5.25}$$

где $I_{max}(T) = \log_2 N$ — количество информации в сообщении по Хартли; T — время, необходимое для передачи сообщения, зависящее от числа объектов N и способа передачи; ΔF — полоса частот, занимаемая в канале связи.

Величину $T\Delta F$ называют широкополосностью кода или способа передачи.

Для неравномерных кодов с различной длиной кодовых комбинаций

$$R_F = \log_2 N/\overline{T}\Delta F,$$

где $\overline{T}$ — среднее время передачи кодовой комбинации.

Если отдельные сообщения передаются с паузами, то R_F характеризует эффективность в момент передачи сообщения аналогично мгновенной мощности при передаче импульсов

Для одного и того же соотношения между временем передачи и паузами система с большим значением R_F использует канал связи эффективнее, т. е. может передавать большее количество информации на единицу полосы занимаемых частот.

С широким развитием телемеханизации, увеличением числа источников и приемников информации и применением ЭВМ в одной системе возникает необходимость в повышении эффективности передачи. Значительное повышение эффективности передачи достигается путем использования общего канала связи для группы рассредоточенных исполнительных или контролируемых пунктов. Чем больше исполнительных пунктов подключено к одному каналу, тем больше эффективность использования канала.

При передаче команд различным объектам через общий канал необходимо передать адрес объекта для его избирания и команду (например, «включить» или «выключить»). В ряде случаев передача осуществляется несколькими ступенями (выбор группы объектов, объекта в группе, передача самой команды и т. п.).

Безадресная передача элементарной команды («включить» или «выключить») не вызывает затруднений. Максимальное количество информации, передаваемой такой командой, равно 1 дв. ед. Технически более сложно закодировать и передать адрес одного из многих объектов. При большом числе объектов в адресе содержится значительно большее количество информации, чем в элементарной команде. Следовательно, в адресных системах (кодовое разделение сигналов) скорость передачи двухпозиционных команд в основном определяется скоростью передачи адресов объектов.

Для избирания одного из N рассредоточенных или сосредоточенных объектов необходимо передать присвоенную данному объекту комбинацию импульсов (символов) кода. Чем больше объектов включено в общий канал связи, тем большее число комбинаций N должен иметь код, т. е. тем большее количество информации должно содержаться в адресе объекта.

С пункта управления команды передаются разным объектам не одновременно, т. е. вначале передается одна ко-

манда ТУ и только после подтверждения ее приема может передаваться следующая. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать передачу одного адреса совместно с элементарной командой.

На рис. 5.12 приведены зависимости относительной скорости передачи информации R_F от числа объектов N для различных способов передачи адреса и команды «включить» или «выключить».

Рис. 5.12. Зависимость относительной скорости передачи информации R_F от числа объектов N для различных способов избирания объекта.

1 — двоичный код; *2* — код с частотным разделением и передачей одной из m частот — C_m^1; *3* — временной распределительный код — C_N^1.

Из рис. 5.12 следует, что наибольшая эффективность передачи может быть получена при использовании двоичного кода.

Вследствие низкого быстродействия промышленных систем ТУ, ТС и ТИ используемые в телемеханике типовые телеграфные и телефонные каналы во многих случаях недогружены, т. е. их емкость значительно превышает требуемую. Рассмотрим в качестве примера циклический опрос объектов, рассредоточенных по каналу с полосой пропускания ΔF, с двоичным кодом для вызова объекта.

Минимально допустимое время цикла в таком канале из (5.25)

$$T_{ц\,min} = k_ц TN = k_ц \frac{\log_2 N}{R_F\,\Delta F} N, \qquad (5.26)$$

где T — время передачи одного сообщения ТУ, ТС или ТИ; N — суммарное число сообщений ТУ, ТС или ТИ, передаваемых в одном направлении; $k_ц$ — коэффициент, учитывающий квитирование, запрос повторения и т. п. ($k_ц = 2 \div 3$).

Так, для $N = 1000$, $\Delta F = 120$ Гц, $R_F = 1$ и $k_ц = 2$

$$T_{\text{ц}min} = k_{\text{к}} \frac{\log_2 N}{R_F \, \Delta F} N \approx 160 \text{ с.}$$

Для трубопроводов, нефтепромыслов и других промышленных объектов из технологических соображений допустимо $T_{\text{ц}} \approx 3600$ с, т. е. $T_{\text{ц}} \gg T_{\text{ц}\,min}$. В среднем сигналы ТУ, ТС или ТИ необходимо передавать еще реже (см. гл. 13), при этом емкость канала будет сильно недоиспользована. Для повышения эффективности передачи сообщений ТУ, ТС и ТИ целесообразно передавать только новую информацию. Дальнейшее повышение эффективности достигается путем введения временного кодового разделения и приоритетов в передаваемые сообщения ТУ, ТС, ТИ и ПД (описанных в § 14.4). Адресные методы позволяют простыми средствами повысить также помехоустойчивость передачи путем применения защищенных кодов.

Одним из методов повышения эффективности передачи является статистическое кодирование по множеству сообщений. Идея такого кодирования близка к идее описанного в гл. 2 метода статистического кодирования в одном канале, при котором более часто встречающиеся сообщения передаются более короткими кодовыми комбинациями. В отличие от этого при кодировании по множеству рассматривается не последовательность сообщений, передаваемых одному объекту (в одном канале), а совокупность сообщений, передаваемых многим объектам (или от многих источников) по общему каналу связи (рассредоточенные объекты).

Проиллюстрируем статистическое кодирование по множеству на примере простейших двухпозиционных объектов. В табл. 5.2 записаны сигналы, передаваемые для каждого объекта в виде последовательностей нулей и единиц в дискретные интервалы времени. Будем считать, что сигнал передается только в дискретные интервалы времени (соответствующие включению или выключению объекта). Рас-

Таблица 5.2

Номер объекта	Время					
	T	$2T$	$3T$	$4T$	$5T$	$6T$
1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0

сматривая сигналы, передаваемые всем объектам в любой дискретный интервал времени, т. е. любой столбец, замечаем, что при редком изменении состояний объектов наиболее часто сигналы в столбце будут состоять из одних нулей, менее часто будут содержать одну единицу, значительно реже — две единицы и т. д. Неравновероятность сигналов создает возможность резкого повышения эффективности передачи путем соответствующего выбора кодовых комбинаций.

К простейшему случаю статистического кодирования по множеству объектов относится обычная адресная передача, при которой комбинации, состоящие из одних нулей, не передаются. Комбинация с одной единицей в столбце (когда один из объектов изменил свое состояние) передается кодом длительностью T, который содержит сигнал о номере объекта (адрес) в столбце и текст (например, «включить» или «выключить»). Комбинация, состоящая из двух единиц, может передаваться путем последовательной передачи двух адресных посылок. Время передачи при этом будет $2T$. Комбинация из K единиц в столбце передается за время KT, где $1<K<N$, N — число объектов.

В отличие от описанного в гл. 2 статистического кодирования, требующего тем большую задержку, чем больше избыточность, при кодировании по множеству задержка, большая чем T, возникает редко и тем реже, чем больше избыточность. Практически в одном столбце передается не более одной кодовой комбинации. Статистическое кодирование по множеству может быть усовершенствовано путем введения приоритета по срочности, описанного в § 14.4.

Следовательно, эффективность передачи в многоканальных системах ТУ, ТС, ТИ существенно повышается путем применения статистического кодирования по множеству источников. Если на передающей стороне имеется память и передается информация только о новых состояниях источников, то количество информации, передаваемое в одном цикле, будет значительно уменьшено по сравнению с обычной циклической передачей. Естественно, что для этого необходимо запоминать состояние источников сигналов телеизмерений не только на приемной, но и на передающей стороне и применять, например, РДМ или Δ-модуляцию. Системы, использующие статистику сообщений для повышения эффективности передачи, относятся к системам с кодовым разделением сигналов, описанным в гл. 1. Они по-

лучили название адаптивных и широко применяются в современных системах.

Определим выигрыш в полосе частот при переходе от многоканальной системы передачи к адресной с передачей только новых состояний источников (новой информации). В многоканальной системе ТИ с временным разделением каналов с двоичным неизбыточным кодом за время одного цикла $T_ц$ передается $N\log_2 q$ двоичных символов (N — число источников, q — число уровней квантования одного источника). Если в адресной системе (кодовое разделение каналов) за время цикла, равное времени цикла в многоканальной системе ($T_ц = T_а$), передается в среднем один адрес источника, изменившего свое состояние, и информация о новом состоянии этого источника (см. табл. 5.2), то за это время надо передать $\{\log_2(N+1)\}+\log_2(q-1)$ двоичных единиц информации. Здесь к N добавляется единица из-за необходимости кодирования адресов всех источников не нулевыми кодовыми комбинациями. Фигурные скобки означают округление до ближайшего целого сверху числа.

Отношение B числа двоичных единиц, передаваемых за время цикла $T_ц = T_а$ в многоканальной системе с временным разделением и адресной системе (с кодовым разделением), будет равно такому же отношению B полосы частот канала связи в многоканальной и адресной системах:

$$B_N = \frac{N\log_2 q}{\{\log_2(N+1)\} + \log_2(q-1)}. \qquad (5.27)$$

Например, для $N = 100$ и $q = 100$ выигрыш при переходе к адресным передачам

$$B_N \approx 100 \cdot 7/(7+7) = 50.$$

Реальная эффективность перехода от временного циклического к временному кодовому разделению сигналов определяется с учетом статистики сообщений.

Статистическое кодирование по множеству позволяет также сравнительно просто реализовать идею адаптивного обмена быстродействия на точность передачи.

В связи с быстрым возрастанием информационных потоков в системах телемеханики, дефицитностью каналов связи и требованием повышения эффективности передач за последнее время в СССР и за рубежом наблюдается тенденция перехода к временному кодовому разделению каналов (к адресным передачам) и применению адаптивных систем.

С этой целью через канал связи в основном передается новая информация, т. е., например, если параметр существенно не изменил своего значения, то он на передающей стороне запоминается и не передается. Как отмечалось в гл. 1 и 3, для этого используют разновидности РДМ или Δ-модуляции.

При РДМ передаются только три значения разности истинного и предсказанного значений параметра: 0, —1 или +1 (см. рис. 1.5,*б*). Однако если канал связи рассчитан только на двухпозиционные сигналы (0 и 1), то каждый трехпозиционный сигнал передается комбинацией из двух элементов двухпозиционного сигнала. Трехпозиционный сигнал 0 передается комбинацией 00; +1 — комбинацией 10, а трехпозиционная комбинация —1 — комбинацией 01. Требуемая полоса частот при этом удваивается, а передача должна быть циклической.

Есть другой вариант передачи разностей истинного и предсказанного значений параметра, получивший название Δ-модуляции и приспособленный для двухпозиционных сигналов 0 и 1, при этом приращение +1 передается как 1, а приращение —1 — как 0. Если параметр не изменяется, то по каналу связи передаются поочередно (циклически) 0 и 1, а счетчики на передающей и приемной сторонах считают число единиц и нулей и восстанавливают истинное значение параметра. Тем не менее в таких системах происходит накопление погрешностей и разность значений истинного и принятого параметров со временем возрастает. Для устранения возникающей погрешности периодически кодом передается значение параметра, что позволяет сбрасывать накопленную погрешность до нуля. В промышленных системах значение параметра телеизмерений передается периодически, например 1 раз в течение нескольких десятков секунд или минут. Период зависит от статистики накопления погрешностей.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СЕТЕЙ (ОБЗОР)

6.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Приведенные в этом параграфе определения в основном взяты из техники связи [7, 12, 24].

Сетью связи называется некоторый набор канального, коммутационного и абонентского оборудования системы

связи, характеризуемый определенными структурными свойствами.

Назначением системы связи является передача (доставка) информации по заданным адресам с обеспечением требуемого качества обслуживания. Основные показатели и параметры системы связи разделяются на две группы: морфологические и функциональные. Под морфологическими понимаются структурные характеристики, а функциональными называются параметры качества обслуживания и показатели эффективности системы связи.

Между характеристиками этих групп существуют взаимные зависимости как внутри каждой группы, так и между группами. Так, параметры качества обслуживания и показатели эффективности зависят от структурных характеристик сети связи, норм обслуживания и т. д.

Под структурой сети понимается совокупность пунктов (управления, контролируемых пунктов, терминалов, узлов коммутации и т. п.) и соединяющих их линий и каналов связи.

В связи с многообразием возможных структур сети, ее параметров и показателей сеть связи описывается более упрощенной моделью сети. При описании такой модели структура задается графом сети, ориентированным или неориентированным в зависимости от типа используемых каналов связи (симплексных или дуплексных).

Граф имеет множество вершин, соответствующих пунктам сети (узлам сети), и множество дуг (ребер) — линий связи. Вершины и дуги записываются набором чисел и нумеруются в определенной последовательности. Каждой вершине приписывается следующий набор чисел: пропускная способность узла, вероятность отказа узла, стоимость (приведенные затраты) узла и т. п.

Каждому ребру приписан следующий вес в виде набора чисел: длина линии, вероятность отказа линии, емкость — число стандартных каналов связи, пропускная способность линии, стоимость линии и т. д. В принятой модели упрощенно предполагается независимость отказов узлов и линий сети связи и считается, что отказы являются следствием только физической ненадежности элементов системы и не зависят от законов и характера их эксплуатации.

Простейшей записью структуры сети может быть матрица связности (смежности) порядка N, в которой по главной диагонали проставляются черточки как знак неопределенности, а вхождения a_{ij} принимают значения 1, если есть

ребро, связывающее пункт (узел) a_i с пунктами a_j и 0, если ребро отсутствует. Так, для простейшей сети с четырьмя пунктами ($N=4$), образующими четырехугольник с пунктами 1, 2, 3 и 4, пронумерованными по часовой стрелке и имеющими ребра, образующие стороны четырехугольника, и ребро по диагонали четырехугольника между пунктами 1 и 3, матрица связности будет следующая.

$$\begin{Vmatrix} - & 1 & 1 & 1 \\ 1 & - & 1 & 0 \\ 1 & 1 & - & 1 \\ 1 & 0 & 1 & - \end{Vmatrix}$$

Для оценки сетей связи вводятся следующие матрицы.

1. Матрица длин ребер (линий связи)

$$L = \| l_{ij} \| ,$$

где l_{ij} — расстояние по линии от пункта i до пункта j: $l_{ij}=0$ для $i=j$ и $l_{ij}=\infty$, если между a_i и a_j нет ребра.

2. Матрица пропускных способностей ребер

$$C = \| c_{ij} \| ,$$

где c_{ij} — максимальное число бит в секунду, которое может быть пропущено линией связи ребра. Этот показатель также называется емкостью линии (ребра).

3. Матрица надежности

$$P = \| p_{ij} \| ,$$

где p_{ij} — вероятность надежной работы данного ребра сети, причем $q_{ij}=1-p_{ij}$ — вероятность выхода его из строя.

4. Матрица стоимостей

$$W = \| \omega_{ij} \| ,$$

где ω_{ij} — стоимость ребра между пунктами i и j.

В дополнение к перечисленным могут быть использованы и другие показатели, такие, как стоимость передачи по ребру единицы объема сообщения, затухания в канале связи и т. д.

Каналом связи называется совокупность устройств и тракта распространения колебаний (в электромагнитном или другом поле) для передачи потока информации из одной точки сети в другую, не зависимой от передачи по другим каналам связи. Каналы связи могут быть ориентированными или неориентированными (симплексными или дуплексными).

Линией связи называется совокупность (пучок) каналов связи, соединяющих непосредственно два пункта без прохождения через другие узлы.

Связностью сети называется минимальное число независимых путей между каждой парой узлов сети. Рассматриваемые далее однофидерная и древовидная магистральные сети относятся к односвязным. Полносвязная сеть имеет связность, равную $N-1$, где N — число пунктов (узлов). Для получения высокой надежности и живучести сети связность должна быть не менее двух.

Это достигается, например, путем кольцевания сети связи, так же как и в энергосистемах. Как будет показано в этой главе, путем введения дополнительных узлов, так называемых точек Штейнера, в определенных случаях одновременно может возрастать связность и сокращаться суммарная протяженность линий связи.

Нецентрализованные сети для связи каждого абонента с каждым обычно имеют многосвязную ячеистую структуру [7, 12, 24], в то время как централизованные сети, рассматриваемые в данной книге, для связи между ПУ и КП имеют более простую односвязную или двухсвязную структуру. Переход от односвязных к дву- и многосвязным сетям обычно требует введения маршрутизации передаваемых сообщений.

Надежностью называется свойство объекта (сети), заключающееся в его способности выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации. Надежность характеризуется вероятностью безотказной работы в заданном интервале времени, средним временем наработки на отказ и другими критериями оценки.

По рекомендациям группы МККТТ надежность системы связи определяется отношением времени работоспособности сети связи к общему времени эксплуатации.

Живучестью сети называется вероятность ее функционирования в условиях повышенной вероятности выхода из строя как линий связи, так и узлов. Для характеристики живучести принимают, например, вероятность сохранения связности сети или вероятность снижения числа возможных связей между корреспондирующими парами сети. В связи с этим увеличение числа ребер приводит к повышению надежности и живучести, так как возрастает возможность установления связей по нескольким путям. Для централизованных сетей связи, рассматриваемых в книге, такая задача решается несколько проще.

При оптимизации сети связи и ее структуры обычно используются экономические критерии, рассмотренные далее, а надежностные и структурные характеристики используются как дисциплинирующие (ограничивающие) факторы.

Как отмечалось ранее, алгоритмическая сложность задач оптимизации сетей связи такова, что точные методы их решения с полным перебором всех вариантов методами математического программирования даже на высокопроизводительных ЭВМ практически неприемлемы.

Из опыта оптимизации сетей в технике связи (децентрализованных) [24], несмотря на приближенный характер эвристических алгоритмов построения сетей связи, применение процедур эвристической оптимизации позволяет снизить затраты на проектируемую сеть связи примерно на 30 %.

Примерно такие же результаты могут быть получены и при проектировании с применением эвристических методов оптимизации централизованных сетей, рассматриваемых в данной книге.

6.2. КРАТКИЙ ОБЗОР СТРУКТУР

Между сетями телеуправляемых комплексов и АСУ на нижних ступенях иерархии, которые описываются в этой главе, и сетями ЭВМ на верхних ступенях есть существенные различия. На нижних ступенях применяется централизованная структура, и они меньше информационно загружены, в то время как крупные сети с ЭВМ имеют в основном децентрализованную структуру, больше загружены и обеспечивают связь каждого с каждым. Крупные сети всегда используют каналы Министерства связи, в то время как линии связи телеуправляемых комплексов и АСУ, расположенные на территории крупных заводов, нефтепромыслов, ирригационных систем и других объектов, имеют централизованную структуру и свою специфику. Они проектируются, а часто и строятся, и принадлежат соответствующим отраслям народного хозяйства, а не Министерству связи. Поэтому выбор сетей связи относится к области автоматики и телемеханики и осуществляется с учетом специфики сетей.

Одной из первых проблем, возникающих при создании информационных сетей, является проблема оптимизации их структуры. Из-за многообразия требований и невозможности перебора всех вариантов строгое решение этой проб-

лемы практически невозможно даже на высокопроизводительных ЭВМ, поэтому успешно развиваются приближенные, квазиоптимальные (эвристические) методы, изложенные в данной главе, которые дают решения с практически допустимыми отклонениями от точных решений.

В этой главе систематизированы работы по оптимизации централизованной структуры сетей телеуправляемых комплексов и АСУ, изложенные в [9, 10].

Для сетей телеуправляемых комплексов и АСУ характерно использование многих классов и подклассов структур, а также различного числа узлов и разнообразных линий связи, соединяющих между собой ПУ и КП. Контролируемые пункты, пункты управления и линии связи при этом во многих случаях неоднородны и имеют, в свою очередь, большое число разнообразных параметров. Поэтому анализ и синтез структур обычно проводятся на упрощенных моделях, отражающих достаточно достоверно только важнейшие зависимости рассматриваемой системы.

Структура сети описывается графом $G(A, L)$, который представляет собой совокупность двух множеств: $A=\{a_i\}$, $i=\overline{1,n}$ — количество вершин (пунктов) системы; $L=\|l_{ij}\|$, $i=\overline{1,n}$; $j=\overline{1,n}$ — матрица ребер, соединяющих вершины графа. Ребрами являются линии связи. Структура характеризуется взаимосвязью составляющих ее подсистем.

Очень сложная структура сетей связи может быть разделена на более простые структуры, каждая из которых, в свою очередь, может делиться на еще более простые и т. д. до образования простейших (примитивных) структур. К простейшим относятся структуры, которые не могут быть разделены на еще более простые.

Известны три (рис. 6.1, *а—в*) простейшие структуры, имеющие параллельное, последовательное и веерообразное (радиальное) соединения элементов (звеньев). Все другие структуры сетей связи образуются путем комбинирования исходных простейших структур. Рассмотрим классификацию структур сетей связи от простейших до более сложных путем постепенного их усложнения. Ограничимся централизованными структурами, в том числе иерархическими, для связи ПУ с каждым КП, применяемыми в телеуправляемых комплексах и АСУ. Децентрализованные структуры сетей, осуществляющие связь каждого абонента с каждым другим, широко применяемые в системах связи и в сетях ЭВМ на высших ступенях иерархии, анализируются в [7, 12, 18,

24]. Сначала рассмотрим сети связи с одним ПУ, а в дальнейшем перейдем и к иерархическим комплексам с несколькими или многими ПУ.

Предположим, что система состоит из множества КП, произвольно расположенных на площади и управляемых из одного ПУ. Пункт управления соединяется с контролируемыми пунктами с помощью проводных линий (каналов) связи, образующих определенный класс или подкласс структуры. На рис. 6.1, *г*, *д* приведены два класса примитивных

Рис 6.1. Последовательная, параллельная и веерообразная (радиальная) простейшие структуры.

структур: радиальная (веерообразная) (рис. 6.1,*г*) и цепочечная (последовательная) (рис. 6.1,*д*). При радиальной структуре сетей требуются наиболее протяженные, а следовательно, и более дорогостоящие линии связи, в то время как цепочечные структуры линии связи имеют минимальную протяженность, но и минимальную надежность. Все другие способы соединения КП с ПУ имеют промежуточные, более сложные структуры (не примитивные).

Переход к более сложным структурам позволяет выбрать оптимальное решение, например, обеспечивающее заданную надежность и пропускную способность при меньшей стоимости линий связи. В процессе оптимизации сетей возникают противоречивые требования. Повышение надежности достигается путем увеличения средней протяженности линий, соединяющих КП с ПУ, включая кольцевание каналов связи. Кроме того, для повышения надежности применяются магистральные линии (каналы) повышенной надежности и пропускной способности.

На рис. 6.2,*а* приведена структура магистральной линии связи с простейшими ответвлениями (ветвями) на

контролируемые пункты. Сети связи с магистральной структурой эффективны для КП, размещаемых на территории, имеющей удлиненную, вытянутую форму и менее эффективны, когда КП размещены на площади круга, квадрата или на площади более сложной формы. Они требуют строительства высоконадежной магистрали с повышенной пропускной способностью.

Дальнейшим усложнением магистральной структуры является древовидная, приведенная на рис. 6.2, *б* и отличающаяся от магистральной наличием более сложных ветвей с вторичными ответвлениями. Древовидная структура более эффективна, чем магистральная, для КП, размещаемых на площади круга, квадрата и т. п.

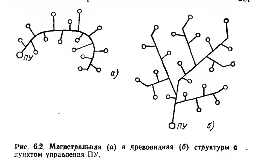


Рис. 6.2. Магистральная (*а*) и древовидная (*б*) структуры с пунктом управления ПУ.

Как будет показано в последующих параграфах, к более эффективным структурам при размещении контролируемых пунктов на площади круга, квадрата и т. п. относится комбинированная к у с т о в а я с т р у к т у р а, представляющая собой «куст» из независимых деревьев. На рис. 6.3, *а* представлена такая структура для равномерно рассредоточенных КП с четырьмя независимыми деревьями и с ПУ, размещенным в центре квадрата.

С применением параллельно подключенных к ПУ деревьев повышаются надежность и автономность сети без существенного увеличения ее протяженности, поэтому кустовая структура широко применяется в системах телеме-

ханики при недогруженных каналах связи на нефтепромыслах, в ирригации, на крупных заводах, в коммунальном хозяйстве с КП, размещенными на большой площади.

С переходом к интенсивно нагруженным каналам связи и с повышением требований к достоверности передачи информации переходят к более сложным комбинированным структурам с широким применением кольцевания линий связи и установке пунктов коммутации кана-

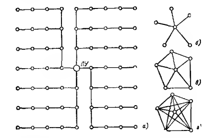


Рис. 6.3. Кустовая с четырьмя деревьями (*а*), звездная (*б*), звездно-кольцевая (*в*) и полносвязная (*г*) структуры.

лов связи. Примером комбинированных структур являются сети с древовидно-магистральными линиями связи.

На рис. 6.3, *в* и *г* приведены примеры кольцевания простейших радиальных линий и образования радиально-кольцевых сетей связи повышенной надежности и пропускной способности. Такие сети связи применяются в АСУ при интенсивно нагруженных линиях высокой надежности. Из сетей, приведенных на рис. 6.3, наиболее экономной по числу линий связи является радиальная структура.

Здесь число линий связи

$$M = N - 1, \qquad (6.1)$$

где N — суммарное число пунктов. Пункт управления находится в одном из КП.

Однако при такой структуре отказ любой из линий связи приводит к ухудшению функционирования системы, поэ-

тому может возникать необходимость резервирования сети. Для радиально-кольцевой структуры число линий связи (рис. 6.3, *в*)

$$M_{рк} = 2(N-1). \qquad (6.2)$$

Полносвязная сеть (рис. 6.3, *г*) образуется по принципу каждый пункт с каждым, при этом число каналов связи

$$M_{п} = C_N^2 = N(N-1)/2. \qquad (6.3)$$

Это наименее экономная, но наиболее надежная и живучая сеть. Если необходимо учитывать не только надежность, но и экономические потери по критерию полных затрат (см. § 20.3), то, как будет показано в последующих параграфах, при недогруженных линиях связи лучшие результаты для КП, рассредоточенных по площади, имеет кустовая структура сетей связи без кольцевания или с кольцеванием линий. Необходимость кольцевания возрастает с повышением требований к надежности и с увеличением информационной нагрузки в линиях связи.

На рис. 6.4 приведена классификация структур сетей с одним ПУ без резервирования линий. Такие простые структуры целесообразно применять при определенных условиях, рассматриваемых в этой главе. Во многих реальных условиях целесообразен выбор комбинированных структур (древовидно-магистральных, кустовых с кольцеванием, с узлами коммутации и др.) без резервирования или с резервированием. Повышение эффективности сетей связи достигается также путем применения узлов коммутации линий и концентраторов (см. гл. 19).

С увеличением информационной емкости систем при определенных условиях целесообразен переход к большей иерархии управления, т. е. к увеличению ступеней контроля и управления (см. § 6.5).

Введем понятие *коэффициента иерархии* $N_и$, равного числу контролируемых пунктов (или операторов), непосредственно подчиненных ближайшему вышестоящему пункту управления (или начальнику). При неавтоматизированном управлении коэффициент иерархии $N_и \approx 3 \div 20$ и в редких случаях возрастает до $N_и = 100 \div 300$. Для неавтоматизированного производства такими примерами являются число рабочих в бригаде, число бригад в цехе, число цехов на заводе и т. д. В народном хозяйстве при неавтома-

тизированном управлении в отрасли существует 7—12 ступеней (уровней) иерархии.

С уменьшением интенсивности процессов управления коэффициент иерархии может возрастать. Примерами больших коэффициентов иерархии являются число телефонных абонентов, обслуживаемых одной телефонисткой, число охраняемых объектов, обслуживаемых одним оператором в системе охранной сигнализации, и т. д. Здесь коэффициент иерархии может достигать многих сотен и даже тысяч.

С переходом на автоматизированное управление и широким применением ЭВМ оптимальный коэффициент иерархии во многих случаях **возрастает**. Это позволяет упростить сеть, сократить число рангов иерархии, что обычно сопровождается крупным экономическим эффектом.

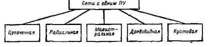


Рис. 6.4 Классификация сетей с одним ПУ.

В § 6.5 рассматривается метод оптимизации иерархии управления, заключающийся в оптимизации коэффициента иерархии на каждой произвольно выбранной ступени управления или контроля, первоначально предложенный в [9]. Этим методом оптимизируется многоступенчатая иерархическая структура (рис. 6.5), если начать оптимизацию с нижнего уровня иерархии и последовательно каждый раз повышать этот уровень.

На нижней ступени управления оптимальный коэффициент иерархии достигает значения, равного сотням КП, в то время как на последующей, более высокой ступени управления он во многих случаях равен единицам, т. е. оптимальный коэффициент иерархии изменяется в широких пределах.

Метод оптимизации иерархических структур, изложенный в этой главе, может быть применен как для информационных систем с потоками информации, протекающими от верхних к нижним ступеням иерархии, так и для систем контроля (сбора информации) с потоками информации, протекающими от нижних к вышестоящим ступеням иерархии.

Этот метод также применим для более сложных комбинированных иерархических систем, например, со связями между ПУ и КП одного и того же ранга.

В крупных системах возникают задачи выбора структуры и построения оптимальной иерархии. Структура сетей ЭВМ выбирается с учетом ряда организационных и других вопросов, связанных с географией, политикой, финансированием, обслуживанием пользователей, обеспечением их документацией и с учетом сетевых ресурсов. Создаваемые

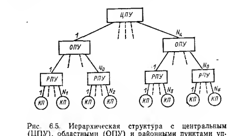


Рис. 6.5. Иерархическая структура с центральным (ЦПУ), областными (ОПУ) и районными пунктами управления (РПУ)

сети ЭВМ имеют централизованную или децентрализованную структуру. Централизованные сети АСУ с одним центром обработки информации являются самыми приемлемыми в силу простоты организации управления потоками информации и низкой стоимости. Как правило, в таких сетях абонент связывается с ПУ единственным маршрутом (рис. 6.5). В таких сетях при выходе из строя одного уча-
Централизованные структуры обычно применяются на пер-
стка сети могут лишиться связи несколько абонентов.
вом этапе разработки сетей ЭВМ.

С появлением «колец» в структуре сети (рис. 6.6, *а*) повышается надежность связи абонента с ЭВМ, но требуются большие затраты на строительство сетей и на управление передачей в такой сети. Наиболее перспективной централизованной структурой сети является *K*-связная сеть.

Существующие сети имеют двух- или трехсвязную структуру с двумя или тремя маршрутами к ВЦ (на рис. 6.6 показана двусвязная сеть для точки *A*). Такая структу-

ра требует больших затрат при разработке и эксплуатации, однако дает наибольшую эффективность обслуживания абонентов. Все крупные и развивающиеся сети имеют, как правило, *К*-связную структуру. Ограничимся рассмотрением некрупных сетей с централизованной структурой, которые представляют интерес для телеуправляемых комплексов и АСУ.

Метод построения односвязных сетей минимальной суммарной длины был предложен Примом, который разработал метод на основе теории графов и применил его для по-

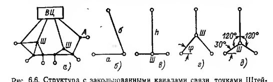


Рис. 6.6. Структура с закольцованными каналами связи, точками Штейнера и построение точки Штейнера *Ш*.

строения сетей связи. Однако такая сеть по другим показателям в большинстве случаев не будет оптимальной (по надежности, эффективности использования и т. п.). Кроме того, вводя дополнительные точки, можно получить сеть еще меньшей длины.

Такие дополнительные точки получили название точек Штейнера (точка *Ш* на рис. 6.6, *а*). Построение точки Штейнера иллюстрируется на рис. 6.6, *б*—*д* на примере равнобедренного треугольника со сторонами *а* и *б*. Кратчайшая связывающая сеть, построенная по алгоритму Прима, будет иметь суммарную длину (рис. 6.6, *б*)

$$L_{\Pi} = a + б.$$

Суммарная длина сети уменьшится, если на сторону (ребро) *а* опустить высоту *h* и заменить высотой *h* сторону *б* треугольника. В результате появится дополнительный узел *Ш*, называемый точкой Штейнера (рис. 1.6, *в*). Если передвигать точку Штейнера по высоте *h*, то суммарная длина сети изменится (рис. 6.6, *г*) и будет равна

$$L = h - (a/2)\operatorname{tg}\varphi + a/\cos\varphi.$$

Найдя производную $dL/d\varphi$ и приравняв ее нулю, получим: $2\sin\varphi = 1$. Следовательно, минимальная суммарная

длина сети L_{min} будет при $\sin\varphi = 0{,}5$, т. е. при $\varphi = 30°$. В этом случае ребра сходятся к точке под равными углами 120° (рис. 6.6, *д*), а суммарная длина сети

$$L = h + a\sqrt{3}/2.$$

Наибольшее сокращение длины сети произойдет для равностороннего треугольника при $a = б$, тогда $L_{min} = a\sqrt{3}$, т. е. длина сети сокращается при введении точки Штейнера не более чем на 13,4 %. Такое построение сети называется построением по алгоритму Штейнера.

Если в структуре сети невозможно образовать равносторонние и равнобедренные треугольники, то точки Штейнера вводятся так, чтобы сходящиеся к ним ребра образовали звезду с углами по 120°, при этом длина сети относительно длины, построенной по алгоритму Прима, сокращается не больше чем на 13,4 %.

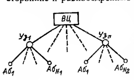


Рис. 6.7. Централизованная структура с узлами концентрации УЗ.

При введении точек Штейнера при сохранении первоначальных ребер может увеличиваться связность сети, а следовательно, ее надежность и пропускная способность, что, например, видно из рис. 6.6, *а*. Следует отметить, что рассмотреный выбор точек Штейнера справедлив только для слабо нагруженных линий связи или для интенсивно нагруженных линий с одинаковой нагрузкой. Для интенсивно нагруженных линий с различной нагрузкой выбор точек Штейнера усложняется [7].

Переходя к интенсивно нагруженным сетям, в которых могут возникать очереди при передаче информации, отметим, что (как будет показано в последующих параграфах) радиальная и древовидная структуры для абонентов, рассредоточенных по площади, не оптимальны. При радиальной структуре происходит значительный перерасход проводных линий связи из-за нерационального их использования, а при кустовой структуре линии загружены очень неравномерно. Ближайшие к ВЦ (ПУ) линии связи оказываются перегруженными, в то время как отдаленные линии могут быть недогруженными и использоваться неэффективно.

Для интенсивно нагруженных сетей более

эффективно применение иерархических структур с промежуточными узлами $УЗ_1$—$УЗ_n$ (рис. 6.7) в виде концентраторов, коммутаторов и связных процессоров или промежуточных вычислительных центров. При этом пропускная способность абонентских линий связи и линий, соединяющих ВЦ с промежуточными узлами, выбирается соответственно различной. Если абонентские линии связи слабо нагружены, то к ним целесообразно подключать несколько абонентов.

Абонентские линии от промежуточных узлов до абонентов могут иметь древовидную, магистральную или кустовую структуру.

Следующим этапом развития сетей связи обычно является повышение их связности с целью увеличения как пропускной способности, так и достоверности передачи информации. Этот этап может быть реализован как при проектировании, так и при дальнейшем расширении сети.

6.3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ НЕДОГРУЖЕННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Приступая к оптимизации структуры проводных линий связи, необходимо сначала рассмотреть выбор критериев оптимизации и методики применения критериев для различных условий.

При решении первой задачи стремятся найти самую экономичную структуру, для которой выполняются требования надежности и пропускной способности каналов связи. Во многих информационных системах производственного назначения максимальные потоки информации значительно меньше пропускной способности каналов связи (нефтепромыслы, ирригация, коммунальное хозяйство и т. д.). Системы работают с недогруженными каналами связи, и поэтому первая задача сводится к нахождению экономически выгодной и надежной структуры.

Такую задачу можно решать, используя критерий полных потерь, описанный в § 20.3. Для выбора методики решения задачи необходимо знать расположение и характеристики КП, а также параметры каналов связи.

Если КП рассредоточены равномерно по площади, а максимальная скорость передачи информации меньше пропускной способности каналов связи, то есть возможность использовать аналитический метод. При невыполнении перечисленных условий выбор структуры сетей осуществляет-

ся алгоритмическими методами с помощью ЭВМ и рассмотрен в последующих параграфах.

Аналитическую задачу можно сформулировать следующим образом: заданы множество равномерно рассредоточенных пунктов системы N и расстояние между двумя соседними КП $l_0=\text{const}$.

Необходимо минимизировать

$$W = C + T_c W_э \tag{6.4}$$

при

$$R_{ij} \leqslant \text{cap}, \tag{6.5}$$

где $C=f_1(l)$ — единовременные капитальные затраты; $W_э=f_2(m)$ — эксплуатационные потери в единицу времени; $l=f_3(m)$ — длина линии связи; m — число деревьев (фидеров); T_c — срок службы системы; R_{ij} — количество передаваемой информации в единицу времени между пунктами i и j; cap — пропускная способность канала связи.

Рассмотрим случай, когда ПУ расположен в центре площади размещения КП, представляющей собой квадратную форму (рис. 6.8). Положим, что отдельные линии связи находятся только в одном из двух дискретных состояний,— рабочем или нерабочем, а средние эксплуатационные потери пропорциональны вероятности P нерабочего состояния КП.

Если P_1 — вероятность того, что отрезок линии длиной l_0 находится в нерабочем состоянии, то вероятность повреждения участка линии длиной l

$$P_l = 1 - (1 - P_1)^{l/l_0}. \tag{6.6}$$

Эксплуатационные потери для участка линий длиной l пропорциональны вероятности повреждения этого участка и числу пунктов, теряющих связь с центром из-за повреждения данной линии связи [10]:

$$W_{эl} = W_{э1} N_l \frac{P l_{ср}}{P_0} = W_{э1} N_l \frac{1-\left(1-P_1^{l_{ср}/l_0}\right)}{P_0}. \tag{6.7}$$

Для $P_1 l_{ср}/l_0 \ll 1$ $P_{l\,ср} \approx P_1 l_{ср}/l_0$, откуда

$$W_{эl} \approx W_{э1} (l_{ср}/l_0) N_l, \tag{6.8}$$

где $W_{э1}$ — эксплуатационные потери в единицу времени для участка линии длиной l_0; $l_{ср}=l/2$ — средняя длина поврежденной линии при линии связи длиной l.

На рис. 6.8 приведены структуры кустовых древовидных линий связи для $N=49$ и числа деревьев m. В дальнейшем будем считать, что ПУ размещен на одном из КП, а линии прокладываются между ближайшими КП по алгоритму Прима. Линии минимальной суммарной длины будут у по-

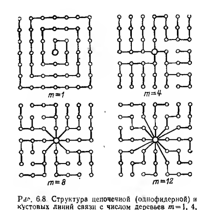


Рис. 6.8 Структура цепочечной (однофидерной) и кустовых линий связи с числом деревьев $m=1$, 4, 8 и 12.

следовательной (однофидерной) линии длиной L_0 ($m=1$, рис. 6.8):

$$L_0 = l_0 (N-1). \tag{6.9}$$

На рис. 6.9, *а* точками отмечены значения $L_к - L_0$ для различных чисел деревьев m, где $L_к$ — суммарная длина кустовой линии с числом деревьев m, рассчитанная в соответствии с рис. 6.9, *а*. Непрерывной кривой изображена аппроксимирующая зависимость

$$L_к - L_0 = 0{,}1\,(m-4)^2\, l_0, \tag{6.10}$$

которую можно рекомендовать для практически выбираемого числа деревьев $m=4 \div 16$. Тогда из (6.9) и (6.10) длина кустовой линии для $m=4 \div 16$

$$L_{\text{н}} = [N - 1 + 0{,}1\,(m - 4)^2]\,l_0. \qquad (6.11)$$

Выражение для потерь и ПУ, находящегося в центре квадрата, получим, если применить критерий полных затрат (см. § 20.3):

$$W_{\text{к}}/C_1 = (1 + Q/m)\,L_{\text{н}}/l_0, \qquad (6.12)$$

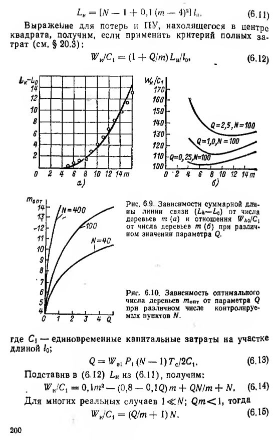


Рис. 6.9. Зависимости суммарной длины линии связи ($L_k - L_0$) от числа деревьев m (а) и отношения W_{ko}/C_1 от числа деревьев m (б) при различном значении параметра Q.

Рис. 6.10. Зависимость оптимального числа деревьев $m_{\text{опт}}$ от параметра Q при различном числе контролируемых пунктов N.

где C_1 — единовременные капитальные затраты на участке длиной l_0;

$$Q = W_{\text{в1}}\,P_1\,(N - 1)\,T_{\text{с}}/2C_1. \qquad (6.13)$$

Подставив в (6.12) $L_{\text{н}}$ из (6.11), получим:

$$W_{\text{н}}/C_1 = 0{,}1m^2 - (0{,}8 - 0{,}1Q)\,m + QN/m + N. \qquad (6.14)$$

Для многих реальных случаев $1 \ll N$; $Qm < 1$, тогда

$$W_{\text{к}}/C_1 = (Q/m + 1)\,N. \qquad (6.15)$$

На рис. 6.9, б приведены зависимости $W_к/C_1=\varphi(m)$, построенные по (6.14), из которых следует, что выбор неоптимального числа деревьев фидеров m может вызвать экономические потери, достигающие десятков процентов от полных затрат и более.

Дифференцируя (6.14) по m, получаем зависимость, приведенную на рис. 6.10:

$$Q=(0{,}2m_{опт}-0{,}8)/(N/m_{опт}^2-0{,}1). \qquad (6.16)$$

Для частного случая, когда единовременные капитальные затраты значительно больше эксплуатационных ($1 \gg\gg Q/m$ и $N \gg 1$), $m_{опт} \approx 4$. При единовременных капитальных затратах, значительно меньших эксплуатационных ($1 \ll Q/m$ для $N \gg 1$ и $m \geqslant 4$),

$$m_{опт} \approx \sqrt{10N}.$$

Следовательно, с увеличением удельного веса эксплуатационных затрат оптимальное число деревьев $m_{опт}$ возрастает.

Рассмотрены также случаи размещения ПУ вне площади и на краю площади размещения КП. Это позволяет оптимизировать кустовую структуру линий связи для самых разнообразных случаев.

6.4. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ НЕДОГРУЖЕННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Применение алгоритмических методов оптимизации структуры сетей целесообразно при существенно неравномерном размещении КП. Оптимизация производится по экономическим критериям, если возможно определить текущие потери из-за нерабочего состояния КП. Наиболее эффективным критерием для решения данной задачи является критерий полных потерь, описанный в § 20.3.

При синтезе структуры линий связи заданным является множество A, имеющее n узлов. Задача заключается в определении связей всех узлов множества A при условии, чтобы полные потери W были минимальными.

Свойства исходных узлов a_i как элементов системы управления описываются множеством I, зависящим от A:

$$g(A) \in I \text{ при } A \in S, \qquad (6.17)$$

где S — искомая структура.

Множества S и I неупорядочены, и любые два элемента (A_1 и A_2) не сопоставимы между собой. Чтобы выбрать из S лучший вариант, необходимо найти способ сопоставления любых A_1 и $A_2 \in S$ между собой. При этом есть лишь единственный способ: индуцировать упорядоченность S путем отображения функции f, $S \to W$, где W упорядочено.

В качестве W может быть любое упорядоченное множество. Функция f, обеспечивающая отображение, является целевой функцией, с помощью которой можно сопоставить любые элементы A_1 и A_2 и тем самым упорядочить S. Для этого индуцируем упорядоченность S по W с помощью f, полагая

$$A_1, A_2 \in S; \tag{6.18}$$

$$\exists W_1,\ W_2 \in W; \tag{6.19}$$

$$W_1 = f(A_1); \tag{6.20}$$

$$W_2 = f(A_2); \tag{6.21}$$

$$W_1 \geqslant W_2 \Rightarrow A_1 \geqslant A_2 \cap W_1 \leqslant W_2 \Rightarrow A_1 \leqslant A_2. \tag{6.22}$$

Таким образом, модель поиска оптимальной структуры можно записать в общем виде:

$$f(A) \to \text{extr}; \tag{6.23}$$

$$g(A) \in S; \tag{6.24}$$

$$A \in S. \tag{6.25}$$

Переходя к математической формулировке задачи синтеза структуры линий связи, введем следующие обозначения, соответствующие обобщенной постановке задачи:

$A = \{a_i\}$, где $i = \overline{1, n}$ — число узлов (пунктов) системы;

$L = \|l_{ij}\|$, где $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, n}$ — матрица длин системы;

$W_э = \|\omega_{эi}\|$, где $i = \overline{1, n}$ — матрица потерь, вызываемых нерабочим состоянием каждого пункта в единицу времени;

$P = \|P_{ij}\|$, где $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, n}$ — матрица надежности линий связи;

I_i, где $i = \overline{1, n}$ — число управляемых объектов на КП;

I_Σ — число объектов, управляемых со стороны ПУ.

С учетом принятых обозначений граничные условия, позволяющие определить S, можно записать в следующем виде:

1) система имеет n узлов a_i, где $i = \overline{1, n}$;

2) в системе имеется только один центр, который располагается в вершине 1: $Ц \in a_1$;

3) структура линий связи может иметь до m деревьев. Множество всех пунктов каждого дерева обозначим Γ_k, где $k=\overline{1, m}$;

4) каждый исходный элемент (КП) может принадлежать только одному дереву:

$$\sum_{i=2}^{n} Y_{ik}=1, \text{ где } Y_{ik}=\begin{cases}1 \text{ при } i\in\Gamma_k;\\ 0 \text{ при } i\notin\Gamma_k;\end{cases} \tag{6.26}$$

5) сумма весовых коэффициентов узлов не может превышать значения для характеристики пункта управления:

$$\sum_{\Gamma_k\in S}\sum_{i=2}^{n} l_{ik}Y_{ik}\leqslant l_\Sigma; \quad Y_{ik}=\begin{cases}1 \text{ при } i\in\Gamma_k;\\ 0 \text{ при } i\notin\Gamma_k;\end{cases} \tag{6.27}$$

6) структура линий связи представляет собой дерево. Используя введенные обозначения и принятые ограничения, можно выполнить строгую запись моделей, описанных в (6.23) — (6.25):

$$\min W=\min\left[\sum_{\Gamma_k\in S}\sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}Y_{ij}\right]. \tag{6.28}$$

Ограничение по характеристикам исходных узлов

$$\sum_{\Gamma_k\in S}\sum_{i=2}^{n} l_{ik}Y_{ik}\leqslant l_\Sigma; \quad Y_{ik}=\begin{cases}1 \text{ при } i\in\Gamma_k;\\ 0 \text{ при } i\notin\Gamma_k,\end{cases} \tag{6.29}$$

$$i=\overline{2, n}; \quad k=\overline{1, m}.$$

Ограничения по конфигурации структуры линий связи

$$Ц\in a_1; \tag{6.30}$$

$$\sum_{i=2}^{n} Y_{ik}=1; \quad Y_{ik}=\begin{cases}1 \text{ при } i\in\Gamma_k, \quad i=\overline{2, n}; \quad k=\overline{1, m};\\ 0 \text{ при } i\notin\Gamma_k.\end{cases} \tag{6.31}$$

Решая задачу, переходим от неупорядоченных множеств состояний системы S к упорядоченному множеству W, при котором ω_1 и ω_2 сопоставимы, т. е., воспользовавшись целевой функцией f, найдем ω_1 и ω_2 из W такие, что $\omega_1=f(A_1)$ и $\omega_2=f(A_2)$. Множество W упорядоченно, и ω_1, $\omega_2\in W$, поэтому справедливо одно и только одно из соотношений $\omega_1 \gtreqless \omega_2$. Таким образом, считаем, что A_1 лучше (хуже) A_2, если $\omega_1>\omega_2$. Исходя из вышесказанного, можно сделать

вывод о том, что синтез структуры линий связи включает в себя добавочное условие — оптимизацию целевой функции W, которая зависит от локальных целевых функций, определяемых целями, назначением, особенностями синтезируемой структуры.

Метод постепенных замен, начиная с радиальных линий. В описываемом методе исходной является радиальная структура линий связи. Такая радиальная сеть представлена на рис. 6.11, *а* и является самой

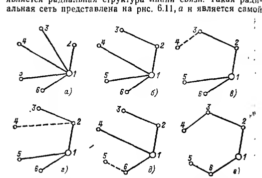


Рис. 6.11. Формирование структуры линий связи по методу постепенных замен радиальных линий.

дорогостоящей. Ее применение целесообразно только при большой нагрузке каналов связи и выполнении некоторых других условий при передаче данных. Для недогруженных каналов связи во многих случаях целесообразно присоединять к одной линии связи несколько КП, т. е. применять кустовую структуру.

Будем считать, что экономические потери пропорциональны длине линии связи, а так как полные потери зависят от расстояния (длины линии связи), при построении структуры будем считать его основной переменной.

Легко убедиться в том, что наибольшую суммарную длину имеет радиальная структура линий связи. Поэтому алгоритм исходит из начальной радиальной сети, для которой эксплуатационные потери относительно невелики, так

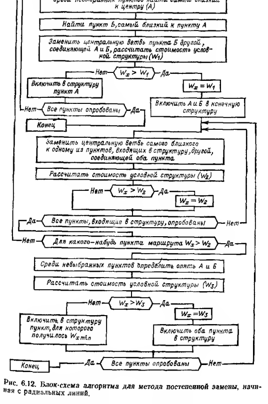


Рис. 6.12. Блок-схема алгоритма для метода постепенной замены, начиная с радиальных линий.

как при такой структуре к каждой линии присоединяется только один пункт, в то время как капитальные затраты велики.

Пример, приведенный на рис. 6.11, иллюстрирует принцип реализации алгоритма. Сначала определяются полные потери для радиальной структуры, приведенной на рис. 6.11, *а*. По алгоритму Прима определяется пункт, самый близкий к центру. Пусть таким будет пункт *2*. Следующий шаг состоит из определения пункта, самого близкого к пункту *2*. Пусть таким будет пункт *3*. Заменяем ветвь, соединяющую пункт *3* с центром, ветвью между пунктами *2* и *3* (рис. 6.11, *б*). Рассчитываем новые полные потери, и, если они меньше предыдущих, новую структуру принимаем вместо предыдущей. Из рис. 6.11, *в—е* видно, как может изменяться структура на каждом шаге до того, как все пункты исследованы.

При оптимизации всегда выбирается самый близкий пункт, так как алгоритм исходит из того, чтобы линии, идущие к самым далеким от центра пунктам, были нагружены как можно меньшим числом пунктов.

На рис. 6.12 приведена блок-схема такого алгоритма.

Сравнение аналитического и алгоритмического методов показывает, что полученные при этом результаты отличаются не более чем на 10 %.

6.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНО НАГРУЖЕННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Отличительной особенностью интенсивно нагруженных сетей является возникновение очередей в процессе передачи информации. Для оптимизации структуры сети в качестве критерия может быть выбрано отношение стоимости к эффективности. Однако в ряде случаев более удобно анализировать сеть по одному основному критерию, одновременно используя другие параметры сети в виде ограничений, при этом в качестве основного критерия целесообразно использовать стоимость, достоверность, время передачи информации или надежность.

Проектирование сетей наиболее часто осуществляется на основе критерия стоимости, что вызвано высокой стоимостью и широким применением сетей. Кроме того, во многих случаях сети могут удовлетворять требованиям, выдвигаемым по другим показателям. Для оптимизации структуры сети, как отмечалось ранее, целесообразно ее

представить в виде графа, у которого вершины отображают узлы, а ребра — линии связи. Если информация по линии связи передается только в одном направлении, то соответствующее ребро в графе должно быть ориентировано в направлении передачи информации. Если информация по линии связи передается в двух направлениях, то соответствующее ребро в графе неориентировано. Каждому ребру и вершине графа присваиваются определенные весовые коэффициенты, характеризующие соответствующий узел или линию связи. Ребро b_{ij} характеризуется длиной l_{ij}, ненадежностью P_{ij} и пропускной способностью C_{ij}. Весовые характеристики ребер могут быть записаны в виде следующих матриц размером $n \times n$:

матрицы длин $L=\|l_{ij}\|$, где l_{ij} — длина линии связи между узлами i и j;

матрицы ненадежности $P=\|p_{ij}\|$, где p_{ij} — вероятность ненадежной работы соответствующей линии связи, определяемая внутренними отказами;

матрицы пропускных способностей ребер $C=\|c_{ij}\|$, где c_{ij} — пропускная способность канала связи между узлами i и j.

В общем случае ставится задача синтеза системы передачи информации между ПУ и КП, размещенными по площади неравномерно. Положим, что:

система состоит из $n-1$ пунктов, при этом пункт i совпадает с вершиной $i=1, 2, .., n$;

центр (ПУ) размещен в вершине 1;

задана симметричная матрица стоимостей $|n \times n|$, где элемент ij представляет собой стоимость линии между вершинами i и j;

задано количество генерируемой информации от каждого пункта q_i;

задана пропускная способность канала связи c_{ij};

задано максимальное число пунктов ρ, которые могут терять связь с центром из-за повреждения линии связи;

задано максимальное время запаздывания информации τ.

Необходимо определить наиболее экономное соединение всех пунктов с центром так, чтобы число пунктов, теряющих связь с центром при повреждении одной линии связи, не превышало заданного и соблюдалось ограничение по пропускной способности каналов связи.

Следовательно, задача минимизации стоимости сети решается при наличии ограничений по надежности и пропуск-

ной способности каналов связи. Задачу можно сформулировать таким образом: необходимо минимизировать

$$\sum_{i}\sum_{j} W_{ij} y_{ij} \qquad (6.32)$$

при следующих ограничениях:

$$c_{ij} \leq cap, \ i=2, \ \ldots, \ n, \ j=1, \ \ldots, \ n;$$

$$t_{ij} \leq \tau, \ i=2, \ \ldots, \ n, \ j=1, \ \ldots, \ n,$$

$$\eta \leq \rho,$$

где t_{ij} — время запаздывания при передаче информации между вершинами i и j; η — число пунктов, подсоединяемых к одному дереву (фидеру); $y_{ij}=1$ или 0.

При этом среди всех возможных деревьев $D(l_s)$ выбирается то, для которого выполняется условие

$$W = \{D(l_k)\} = \min [W\{D(l_1)\}; \ W\{D(l_2)\}, \ \ldots, \ W\{D(l_s)\}], \qquad (6.33)$$

где $W\{D(l_s)\}$ — стоимость дерева длиной l_s.

На основе исходного алгоритма Прима и других алгоритмов разработан и доведен до машинных программ ряд методов, позволяющих находить структуры сети с минимальной суммарной протяженностью. Однако задача определения минимальной стоимости сети при заданных ограничениях еще не решена и является сложной задачей.

Известны некоторые квазиоптимальные методы решения поставленной задачи, в таких случаях линии связи синтезируются в виде дерева. Из теории графов известно, что при этом методе число различных деревьев, которые можно синтезировать с n вершинами, будет равно n^{n-2}. Следовательно, если число пунктов в системе больше 10, то практически невозможно найти оптимальную структуру методом перебора даже при использовании ЭВМ.

В отличие от полного перебора, если принять определенные ограничения по надежности и пропускной способности линий связи, можно найти оптимальный вариант. В этом случае необходимо определить новое дерево, которое может не совпадать с деревом минимальной длины и которое назовем «минимально ограниченным деревом».

Был предложен ряд таких эвристических методов, из которых наиболее эффективным оказался метод Мартина [10].

На рис. 6.13 приведен алгоритм, предложенный Мартиным, с помощью которого оптимизируется структура сети.

Особенность его заключается в многократном повторении оценки экономии, получающейся при замене соединения между пунктом и центром на соединение с еще одним пунктом. На рис. 6.14 показано, что соединение пункта A с центром может быть заменено соединением пунктов A, B и центра.

Получаемую экономию обозначим через $T(A; AB)$.

Как правило, есть много пунктов, с которыми пункт A может быть соединен, при этом каждому пункту соответствует свое значение экономии. Максимально допустимое значение экономии для пункта A в пределах ограничений по нагрузке канала связи обозначим $\hat{T}(A)$.

Предположим, что имеется 12 пунктов, которые необходимо подключить к ПУ (рис. 6.15). Буквами A, B, C... обозначим пункты, наиболее удаленные от центра. Реализация алгоритма начинается с подключения каждого пункта к центру отдельным каналом (рис. 6.16). Затем радиальная сеть, имеющая максимальную стоимость, шаг за шагом модифицируется до получения сети с минимальной стоимостью (рис. 6.17).

Определить число каналов для каждого пункта
Изъять полностью загруженные каналы
Подсчитать стоимость оставшихся центральных каналов
Установить $\hat{T}$ для всех центральных связей в 0
Открыть переменную x
Увеличить x на 1
Открыть переменную z
Увеличить z на 1
Может ли z обработать информацию x ?
Нет
Да
Вычислить $T(x; xz)$
$T(x; xz)$ больше $\hat{T}(x)$?
Нет
Да
$\hat{T}(x) \leftarrow T(x; xz)$
Нет
Проверены все z ?
Да
Нет
Проверены все x
Да
Найти T для $\max(\hat{T})$
$\max(\hat{T}) \geq 0$?
Нет
Предыдущие изменения влияют на это T ?
Нет
Да
Вычислить новое $\hat{T}$ для x
Провести связь для этого T
Вычеркнуть T из таблицы значений $\hat{T}$

Рис. 6.13. Блок-схема алгоритма построения сети по методу Мартина.

Процесс выполнения алгоритма начинается с наиболее удаленного пункта A, для которого отыскиваются варианты сети с подключением его к каждому из остальных пунктов, чтобы удовлетворить ограничение по нагрузке и экономическому эффекту. Такая процедура выполняется для всех пунктов, к которым может быть подключен пункт A, в результате чего отыскивается максимальная экономия $\hat{T}(A)$.

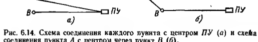


Рис. 6.14. Схема соединения каждого пункта с центром *ПУ* (*а*) и схема соединения пункта A с центром через пункт B (*б*).

Рис. 6.15. Размещение пунктов и центра *ПУ*.

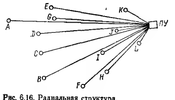


Рис. 6.16. Радиальная структура.

Рис. 6.17. Подключение пункта A через пункт B (*а*) и пункта A через пункт C (*б*).

В частном случае максимальную экономию дает подключение пункта A к пункту D:

$$\acute{T}(A) = T(A{:}AD).$$

Затем аналогичная процедура производится для пункта B, а следовательно, путем подключения к каждому из остальных пунктов находится $\hat{T}(B)$ и т. д.

Далее выбирается максимальное значение экономии $\max(T)$ и производится подключение рассматриваемого пункта. Процедура повторяется со всеми пунктами системы.

6.6 ОПТИМИЗАЦИЯ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Относительно низкая надежность и высокая стоимость протяженных каналов связи требуют большей автономности управляемых объектов и ограниченной емкости системы нижнего ранга. При таких условиях увеличение числа ступеней иерархии управления может быть целесообразно даже для сравнительно простых телеуправляемых комплексов.

Рассмотрим упрощенный метод оптимизации структуры системы, применимый, главным образом, на стадии аванпроекта, когда многие параметры и характеристики системы еще неизвестны [9]. На последующих стадиях эскизного и технического проектирования оптимизация структуры системы практически невозможна без применения ЭВМ из-за сложности решаемых задач. В качестве оптимального критерия выбираем критерий полных потерь (см. § 20.3).

Предлагаемый метод оптимизации заключается в поэтапном выборе коэффициента иерархии N_u на каждой ступени иерархии, начиная с нижней, при котором суммарные затраты на систему были бы минимальными. Средний коэффициент иерархии N_u равен отношению суммарного числа КП к числу ПУ на данной ступени иерархии.

Для удобства анализа разделим систему управления на три части: ПУ, КП и ЛС. При оптимизации целесообразно учитывать стоимость аппаратуры, ЛС и потери, возникающие из-за ненадежности аппаратуры и линий связи. Метод оптимизации структуры системы управления рассматривается при следующих ограничениях:

отказы аппаратуры и линий (каналов) связи наступают независимо друг от друга и обнаруживаются мгновенно;

параметры потока отказов λ, потока восстановления μ и потока сообщений f удовлетворяют соотношению

$$\lambda \ll \mu \ll f; \qquad (6.34)$$

функция распределения вероятности безотказной работы устройств системы выражается экспоненциальным законом.

Известно, что при экспоненциальном распределении функция восстановления $\mu(t)$ принимает вид:

$$\mu(t) = \frac{\lambda\mu}{\lambda+\mu}\left[t + \frac{e^{-(\lambda+\mu)/t} - 1}{\lambda+\mu}\right], \qquad (6.35)$$

причем

$$\frac{\mu(t)}{t}\,\frac{1}{\mu} = \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\left[1 + \frac{e^{-(\lambda+\mu)/t} - 1}{\frac{(\lambda+\mu)}{t}}\right], \qquad (6.36)$$

где t —время работы системы.

При длительной работе системы уравнение (6.36) асимптотически характеризует долю времени прерывания на ремонт

$$\tau_p = \lim_{t\to\infty}(\mu(t)/t\mu) = \lambda/(\lambda+\mu). \qquad (6.37)$$

С учетом того, что $\lambda \ll \mu$, получим:

$$\tau_p \approx \lambda/\mu; \qquad (6.38)$$

потери в системе пропорциональны времени прерывания на ремонт:

$$W_i = \omega_{0i}\,\frac{\lambda_i}{\mu_i}, \qquad (6.39)$$

где W_i — потеря из-за ненадежности i-го блока аппаратуры управления; ω_{0i} — потери из-за нерабочего состояния i-го блока в единицу времени.

Стоимость аппаратуры и количество перерабатываемой информации связаны соотношением

$$E = E_d + MI, \qquad (6.40)$$

где E — стоимость аппаратуры; E_d — составляющая стоимости, не зависящая от объема информации; I — объем информации; M — коэффициент пропорциональности.

Введем следующие ограничения:

при определении полных потерь из-за линий связи предполагаем, что КП равномерно рассредоточены по площади и стоимость линии связи пропорциональна ее длине;

пункт управления может иметь два состояния: рабочее или нерабочее;

надежность аппаратуры λ/μ растет пропорционально количеству вырабатываемой ею информации; причем

$$\lambda_{\text{сист}} = \sum_{i=1}^{k} \eta_i \lambda_i, \qquad (6.41)$$

где i — текущий индекс суммирования; k — различные категории элементов, имеющих одинаковую интенсивность отказов; η — число элементов; все КП однородные.

Задачу поставим следующим образом: задано множество исходных узлов A и расстояние $l_0=\text{const}$ между каждой парой соседних узлов a_i, $a_i \in A$, где каждый узел a_i характеризуется числом управляемых объектов $I_i=\text{const}$ и потерями из-за нерабочего состояния в единицу времени $\omega_i=\text{const}$. Необходимо определить оптимальное число узлов $N_{\text{опт}}$, подключаемых к одному ПУ так, чтобы полные потери при этом были бы минимальными.

Целевую функцию запишем так: минимизировать

$$W = \omega_1(A) + \omega_2(A) \qquad (6.42)$$

при

$$\sum_{i=1}^{n} I_i \leqslant I_{\Sigma}; \qquad (6.43)$$

$$\forall a_i \in A; \;\; I_i = \text{const}; \;\; \omega_i = \text{const}, \qquad (6.44)$$

где $\omega_1(A) = f_1(N)$ — полные потери из-за аппаратуры управления; $\omega_2(A) = f_2(N)$ — полные потери из-за линий связи; I_{Σ} — число объектов, управляемых со стороны ПУ.

Полные потери в системе, имеющей один ПУ, можно определить через

$$W = E_1 + W_1 + \sum_{i=2}^{n}(E_i + W_i) + \sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{n}(E_{ij} + W_{ij})\,У_{ij}, \qquad (6.45)$$

где E_1, E_i, E_{ij} — стоимости аппаратуры ПУ, каждого КП и линий связи, соединяющих пункты i и j; W_1, W_i, W_{ij} — потери из-за ненадежности аппаратуры ПУ, каждого КП и из-за ненадежности линий связи, соединяющих пункты i и j; $У_{ij}=1$, если пункты i и j соединены между собой; $У_{ij}=0$, если пункты i и j не соединены между собой.

Определим коэффициент иерархии при радиальной и кустовой структурах линий связи.

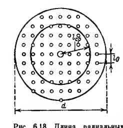


Рис. 6.18. Длина радиальных линий связи при равномерном распределении КП по площади

Коэффициент иерархии при радиальной структуре. При расчете полных потерь, вызываемых нерабочим состоянием линии связи, и радиальной структуре этой линии можно допустить, что площадь, занимаемая всеми КП, образует фигуру, близкую к кругу диаметром d, а ПУ находится в центре круга (рис. 6.18). Число КП равно N, и каждый из них соединен с ПУ отдельной радиальной линией связи.

Площадь фигуры, ограничивающей все КП, с достаточной точностью определяется по формуле

$$S = \left[(\sqrt{N} - 1)\, l_0\right]^2. \qquad (6.46)$$

Тогда диаметр круга с N контролируемыми пунктами

$$d = \sqrt{4/\pi}\,(\sqrt{N} - 1)\, l_0. \qquad (6.47)$$

Если площадь круга диаметром d в 2 раза больше площади круга диаметром $2l_{cp}$, то величину l_{cp} можно считать средней длиной радиальной линии связи.

Это условие запишется в следующем виде:

$$\pi d^2/4 = 2\pi l_{cp}^2, \qquad (6.48)$$

откуда

$$l_{cp} = d/\sqrt{8}. \qquad (6.49)$$

Из (6.47) и (6.49) получим:

$$l_{cp} = (\sqrt{N} - 1)\, l_0/\sqrt{2\pi}. \qquad (6.50)$$

Общая длина всех радиальных линий

$$L_p = (N - 1)\, l_{cp} = (\sqrt{N} - 1)(N - 1)\, l_0/\sqrt{2\pi}. \qquad (6.51)$$

Величину эксплуатационных расходов на $N-1$ радиальных линий средней длиной l_{cp} можно найти из (6.6) и (6.7):

$$W_{\text{эр}} = (W_{\text{эl}}/P_1)(N - 1)\left[1 - (1 - P_1)^{l_{cp}/l_0}\right]. \qquad (6.52)$$

При $l_{cp} P_1 / l_0 \ll 1$ из (6.50) и (6.52) получим:

$$W_{э\,р} = W_{э1} (N-1)(\sqrt{N}-1)/\sqrt{2\pi}. \quad (6.53)$$

Единовременные капитальные затраты на $N-1$ радиальных линий

$$C_р = C_1 (N-1)(\sqrt{N}-1)/\sqrt{2\pi}. \quad (6.54)$$

Полные потери для радиальных линий (см. § 20.3)

$$W_р = C_р + T_c W_{э.р}; \quad (6.55)$$

$$W_р = (C_1/\sqrt{2\pi})(N-1+2Q)(\sqrt{N}-1). \quad (6.56)$$

Из (6.48) видно, что для данного случая

$$W_р = \sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{n}(E_{ij} + W_{ij}) Y_{ij} = (C_1/\sqrt{2\pi})(N-1+2Q)(\sqrt{N}-1), \quad (6.57)$$

где C_1 — единовременные капитальные затраты на участке линии длиной l_0; Q — потери за счет линий связи, определяемые по (6.13).

Потери из-за ненадежности аппаратуры ПУ

$$W_1 = N\omega(\lambda/\mu)_N, \quad (6.58)$$

где ω — потери из-за нерабочего состояния одного КП в единицу времени; $(\lambda/\mu)_N$ — ненадежность аппаратуры ПУ для системы с N контролируемыми пунктами.

Ограничимся случаем, когда ненадежность аппаратуры управления растет пропорционально количеству вырабатываемой ПУ информации и может иметь два состояния: рабочее или нерабочее, тогда

$$(\lambda/\mu)_N = N\lambda/\mu, \quad (6.59)$$

где λ/μ — параметр ненадежности аппаратуры управления для системы с одним КП.

Предполагая, что полные потери, вносимые каждым КП, не изменяются при изменении структуры системы, запишем целевую функцию системы:

$$W/N = E_d/N + \omega\lambda N/\mu + C_1/(N\sqrt{2\pi})[N-1+Q][\sqrt{N}-1]. \quad (6.60)$$

Введем параметр $\theta = \omega(\lambda/\mu)$, определяющий потери из-за ненадежности аппаратуры, тогда (6.60) примет вид:

$$W/N = E_d/N + \theta N + $$
$$+ (C_1/N\sqrt{2\pi})\,[N-1+Q]\,[\sqrt{N}-1]. \qquad (6.61)$$

Используя (6.61), рассмотрим влияние параметров Q и θ на значение коэффициента иерархии.

На рис. 6.19 приведены зависимости удельных полных потерь W/N от числа контролируемых пунктов N для радиальной структуры линий связи и стоимости аппаратуры, не зависящей от объема информации, при следующих зна-

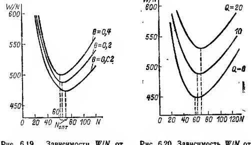


Рис. 6.19. Зависимости W/N от числа контролируемых пунктов N при радиальной структуре линий связи для различных значений параметра θ и $Q=10$.

Рис. 6.20. Зависимость W/N от числа КП—N при радиальной структуре линий связи для различных значений параметра Q.

чениях параметров: $E_d = 10\,000$ руб., стоимость одного километра канала связи $C_1 = 100$ руб. и $Q = 10$ при нескольких значениях потерь θ. Из рис. 6.19 следует, что оптимальное значение коэффициента иерархии уменьшается с уменьшением надежности аппаратуры.

На рис. 6.20 приведены зависимости удельных полных потерь, вычисленных при тех же исходных условиях, что и на рис. 6.19, значении потерь $\theta = 0{,}2$ и для разных значений параметра Q.

Практический интерес представляет оценка возникающих потерь (затрат) при отклонении выбираемого числа КП от оптимального значения $N_{опт}$. Из расчетов следует, что при отклонении числа КП от оптимального на $\pm 10\,\%$,

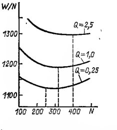
что вполне реально, удельные полные потери возрастают не более чем на 1%. Однако дальнейшее отклонение N и $N_{опт}$ вызывает резкое возрастание удельных полных потерь.

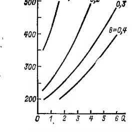
Коэффициент иерархии при кустовой структуре линий связи. Рассмотрим значение ко-

Рис. 6.21. Зависимость удельных потерь W/N от количества КП — N при кустовой структуре линий связи, $Q=1$, $C_1=1000$, $l_0=1$ и различных θ.

Рис. 6.22. Зависимости удельных потерь W/N от числа КП — N при кустовой структуре линий связи для различных значений параметра Q при $\theta=0,2$.

Рис. 6.23. Зависимости оптимального коэффициента иерархии от параметра Q при различных значениях θ.





эффициента иерархии для кустовой структуры линий связи, когда ПУ находится в центре площади. В этом случае полные потери на линии связи определяются из (6.12) и целевая функция

$$W/N = E_d/N + \theta/N + \\ + [1 + Q/m][N - 1 + 0,1(m - 4)^2] C_1. \quad (6.62)$$

Используя (6.62), можно исследовать влияние параметров θ и Q на удельные потери. На рис. 6.21 и 6.22 приведены соответствующие зависимости, вычисленные для $E_d = 1000$ руб., $C_1 = 1000$ руб. Зависимости на рис. 6.21 вычислены для $Q=1$ и для потерь $\theta=0{,}02$, 0,2 и 0,4. На рис. 6.22 приведены аналогичные зависимости для $\theta=0{,}2$ и $Q=0{,}25$; 1,0 и 2,5.

На рис. 6.23 приведены зависимости оптимального коэффициента иерархии $N_{и}=N_{опт}$ от Q для разных потерь θ. Из рис. 6.21—6.23 видно, что оптимальное значение $N_{опт}$ возрастает с увеличением Q и с уменьшением θ. Следует отметить резкое увеличение оптимального значения коэффициента иерархии при кустовой структуре по сравнению с его значением при радиальной структуре ЛС (см. рис. 6.19).

Таким же путем можно определить коэффициент иерархии при кустовой структуре ЛС и расположении ПУ на краю и на вершине площади размещения КП. Можно показать, что во всех этих случаях коэффициент иерархии при кустовой структуре значительно возрастает по сравнению с коэффициентом иерархии при радиальной структуре [9].

Заключение

Материал данной главы поможет научно обоснованно выбирать централизованные структуры проводных сетей связи. Такая оптимизация сопровождается крупным экономическим эффектом, резко возрастающим с увеличением числа пунктов и протяженности сети.

Выбор и оптимизация децентрализованных структур сетей, применяемых в технике связи для передачи сообщений от каждого к каждому абоненту, рассматриваются, например, в [7, 12, 24].

В книге не рассматриваются все проблемы оптимизации централизованных структур сетей связи. К ним относится оптимизация более сложных многосвязных структур, структур с узлами коммутации и др.

В заключение сформулируем основные выводы и рекомендации, вытекающие их материалов данной главы.

Приведенный обзор структур сетей связи позволяет выбрать тип структуры в зависимости от требований к системе связи и географического размещения ПУ и КП.

При оптимизации структуры сетей целесообразно использовать экономические критерии с дополнительными ог-

раничениями по пропускной способности и надежности линий связи.

Аналитический метод оптимизации структуры сетей применяется при равномерном размещении пунктов по площади или вдоль линий. Он позволяет наиболее просто оптимизировать структуру при размещении пункта управления внутри или вне «кроны» из КП.

Для неравномерного размещения контролируемых пунктов по площади оптимизация структуры сетей осуществляется алгоритмическими методами, при этом решение задач оптимизации существенно зависит от информационной загрузки сети. В простейшем случае слабой информационной загрузки сети, когда очереди еще не возникают, наиболее эффективна кустовая структура сетей.

Существует оптимальное число «деревьев» (фидеров), зависящее от размещения пункта управления и от других параметров сети. Отклонение от оптимального числа «деревьев» в пределах ± 10 % приводит к экономическим потерям в пределах 1—2 %. Однако с дальнейшим отклонением от оптимального числа деревьев экономические потери резко возрастают и могут превышать десятки процентов.

Кустовые структуры широко применяются на нефтяных промыслах и были рекомендованы в [9].

Необходимо отметить, что с переходом к волоконно-оптическим каналам связи резко возрастет пропускная способность каналов, возникновение очередей будет мало вероятно и поэтому кустовая структура будет более эффективной.

Введение точек Штейнера позволяет в ряде случаев сократить протяженность сети от 0 до 12 % и увеличить ее связность, т. е. повысить надежность и живучесть сети.

С переходом к информационно-загруженным сетям, у которых могут возникать очереди, при оптимизации структуры сетей необходимо вводить ограничения на пропускную способность каналов связи и применять каналы с различной пропускной способностью для уменьшения очередей до допустимого значения. В этом случае целесообразно применение также кустовой структуры сетей.

Из-за алгоритмической сложности задач оптимизации структуры сетей точное решение путем перебора всех вариантов, даже на высокопроизводительных ЭВМ, неприемлемо, поэтому применяются квазиоптимальные, эвристические

методы, дающие приближенные решения с погрешностью, обычно не превышающей 10 %.

Погрешность может быть уменьшена, а задача упрощена при введении ограничений по надежности и пропускной способности каналов.

Из сравнительного анализа квазиоптимальных методов оптимизации структуры следует, что наименьшие затраты машинного времени требует метод Мартина.

Для алгоритмических методов оптимизации структуры, так же как и для аналитического метода, есть оптимальное число «деревьев», отклонение от которого приводит к экономическим потерям, имеющим примерно аналогичные характер и значение.

Структура информационно-загруженных сетей с возникающими в них очередями существенно отличается от незагруженных сетей. С возрастанием информационной нагрузки должен происходить переход к сетям, имеющим иерархическую структуру с все возрастающей пропускной способностью каналов связи на верхних ступенях иерархии и размещением концентраторов или узлов коммутации в пунктах (узлах) иерархической структуры. Для промежуточных ситуаций целесообразно применение комбинированных структур.

Повышение надежности и живучести достигается путем повышения связности сетей. По данным сети АРПА требуемая высокая надежность достигается с переходом к двусвязным сетям. Это осуществляется путем кольцевания сетей и введения маршрутизации в передаваемые сообщения.

Введение коэффициента иерархии [9] позволяет упростить задачу оптимизации структуры крупных многоступенчатых систем и комплексов путем последовательной оптимизации на каждом уровне иерархии, начиная с нижнего. Существует оптимальный коэффициент иерархии, при котором экономические потери минимальны. Отклонение от оптимального коэффициента иерархии в пределах ± 10 % приводит к экономическим потерям в пределах 0,5—1 %. Дальнейшее отклонение вызывает все большие возрастающие потери, которые могут достигать десятков процентов.

Значение коэффициента иерархии на различных ступенях иерархии может быть существенно различным. Кроме того, коэффициент иерархии при кустовой структуре линий связи в несколько раз превышает коэффициент иерархии радиальной структуры линий.

Совместное применение разработанных методов опти-

мизации структуры сетей с пунктом управления внутри и вне «кроны» из контролируемых пунктов и метод оптимизации иерархических структур позволяют оптимизировать структуру сложных телеуправляемых комплексов с несколькими пунктами управления.

Из материала главы следует, что с общей тенденцией укрупнения телеуправляемых комплексов и АСУ возрастает и значимость оптимизации структур сетей связи.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

СХЕМЫ ДИСКРЕТНОГО ДЕЙСТВИЯ

7.1. ОСНОВЫ АЛГЕБРЫ ЛОГИКИ

В дискретных телемеханических устройствах находят широкое применение двухпозиционные логические элементы, состояние входов и выходов которых характеризуется двумя различными уровнями напряжения. Действие таких элементов может быть выражено аналитически при помощи математического аппарата двузначной алгебры логики. В специальной литературе этот раздел математики называют также исчислением высказываний или алгеброй Буля (булевой алгеброй).

Алгебра логики позволяет записать входные и выходные сигналы дискретных схем в виде буквенных обозначений (символов) и функциональные зависимости между входными и выходными сигналами в виде алгебраических формул (логических функций), в которых связи между переменными выражаются специальными знаками.

Наибольшее применение нашла функционально-полная система логических операций: **умножения** (конъюнкции), **сложения** (дизъюнкции) и **отрицания** (инверсии). Функционально-полной эта система называется потому, что при помощи указанных трех операций можно выразить все остальные операции двузначной алгебры логики.

Логические умножение и сложение выражаются соответственно точкой (·) и знаком плюс (+), а отрицание — чертой над символом переменной. Символы переменных изображаются буквами латинского алфавита.

Использование для логических умножения и сложения соответственно знаков точка и плюс придает логическим функциям сходство с функциями обычной алгебры, что облегчает оперирование с ними и практическое применение

при проектировании дискретных устройств. Однако в специальной литературе используются также следующие знаки: для логического умножения &, Λ, ⋂; для логического сложения V, U; операция отрицания иногда выражается штрихом у символа переменной (a').

Каждая переменная в логической функции может принимать два различных значения, которые принято обозначать соответственно 0 и 1.

Существует ряд законов, отображающих тождественность различных логических функций, под которой понимается одинаковая зависимость значений функций от значений, содержащихся в них символов. Тождественность принято выражать знаком равенства (=).

Тождества алгебры логики позволяют преобразовывать дискретные схемы и используются при их проектировании.

Приведем наиболее важные тождества.

Переместительные законы:

1) $a \cdot b = b \cdot a$; 2) $a + b = b + a$.

Сочетательные законы:

3) $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$; 4) $(a + b) + c = a + (b + c)$.

Распределительные законы:

5) $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$; 6) $a \cdot b + c = (a + c) \cdot (b + c)$.

Законы отрицания (инверсии):

7) $\overline{a \cdot b} = \bar{a} + \bar{b}$; 8) $\overline{a + b} = \bar{a} \cdot \bar{b}$.

Законы повторения:

9) $a \cdot a \cdot a \ldots a = a$; 10) $a + a + a + a + \ldots + a = a$.

Действия с константами 0 и 1:

11) $a \cdot 0 = 0$; 12) $a \cdot 1 = a$; 13) $a + 0 = a$; 14) $a + 1 = 1$;

15) $0 \cdot 0 = 0$; 16) $0 + 0 = 0$; 17) $0 \cdot 1 = 0$; 18) $0 + 1 = 1$;

19) $1 \cdot 1 = 1$; 20) $1 + 1 = 1$.

Действия с инверсными символами:

21) $a \cdot \bar{a} = 0$; 22) $a + \bar{a} = 1$; 23) $\bar{\bar{a}} = a$; 24) $\bar{0} = 1$;

25) $\bar{1} = 0$.

При преобразовании сложных функций с целью минимизации входящих в них переменных хорошие результаты дает применение следующих тождеств:

26) $x \cdot f(x, \bar{x}, y, z, \ldots, w) = x \cdot f(1, 0, y, z, \ldots, w)$;

27) $\bar{x} \cdot f(x, \bar{x}, y, z, \ldots, w) = \bar{x} \cdot f(0, 1, y, z, \ldots, w)$;

28) $x + f(x, \bar{x}, y, z, \ldots, w) = x + f(0, 1, y, z, \ldots, w)$;

29) $\bar{x} + f(x, \bar{x}, y, z, \ldots, w) = \bar{x} + f(1, 0, y, z, \ldots, w)$.

Тождества 26 и 27 можно выразить таким правилом: если в логической функции какая-либо переменная (x или $\bar{x}$) входит в произведение с рядом других аргументов, то в такой функции все остальные одноименные переменные можно заменить единицей, а все соответствующие инверсные переменные — нулем.

Тождества 28 и 29 можно выразить таким правилом: если в логической функции какая-либо переменная (x или $\bar{x}$) входит в виде суммы с рядом других аргументов, то в такой функции все остальные одноименные переменные можно заменить нулем, а все соответствующие инверсные переменные — единицей.

Использование тождеств 26—29 позволяет преобразовывать логические функции, не раскрывая в них скобки.

Пример. Дана логическая функция

$$f = \left[x\,(\bar{a}\cdot x + b\cdot\bar{y} + \bar{c}\cdot z) + \bar{y}\,(\bar{c}\cdot x + a\cdot\bar{y} + b\cdot z) + z\cdot(b\cdot x + c\cdot y + a\cdot z)\right]\cdot a\cdot b\cdot\bar{c}.$$

Требуется преобразовать эту функцию с целью минимизации входящих в нее переменных.

На основании тождеств 26 и 27, применив их к самым крайним переменным a, b, $\bar{c}$, вынесенным за квадратные скобки, получим:

$$f = \left[x\,(0\cdot x + 1\cdot\bar{y} + 1\cdot z) + \bar{y}\cdot(1\cdot x + 1\cdot\bar{y} + 1\cdot z) + z\cdot(1\cdot x + 0\cdot y + 1\cdot z)\right]\cdot a\cdot b\cdot\bar{c}.$$

Далее, применяя последовательно тождества 11 и 12, 26 и 27, 14 и 12, 28 и 29, 16 и 11, проделаем следующие преобразования:

$$f = \left[x\cdot(\bar{y} + z) + \bar{y}\cdot(x + \bar{y} + z) + z\cdot(x + z)\right]a\cdot b\cdot\bar{c} =$$
$$= \left[x(\bar{y} + z) + \bar{y}\cdot(x + 1 + z) + z(x + 1)\right]\cdot a\cdot b\cdot\bar{c} =$$
$$= \left[x\cdot(\bar{y} + z) + \bar{y} + z\right]a\cdot b\cdot\bar{c} = \left[x\cdot(0 + 0) + \bar{y} + z\right]\cdot a\cdot b\cdot\bar{c} =$$
$$= (\bar{y} + z)\cdot a\cdot b\cdot\bar{c}.$$

Полученная после преобразования логическая функция содержит всего пять переменных вместо 24 переменных заданной исходной функции, но обе эти функции выражают одинаково действующие (равносильные) дискретные схемы.

7.2. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Рассмотрим сначала простейшие логические элементы, название которых непосредственно связано со словесным высказыванием условий работы отдельных исполнительных элементов.

Для двухпозиционных дискретных элементов принято обозначать различные значения входных или выходных сигналов 0 и 1. Срабатыванием элемента считается изменение его состояния при поступлении на его вход сигнала 1. При этих условиях легко составить логическую функцию для одного исполнительного элемента по словесному высказыванию его действия.

Если в словесном высказывании говорится, что какой-либо исполнительный элемент X должен сработать при срабатывании воздействующего на него элемента A, то в логическую функцию записывается прямой (неинверсный) символ (переменная) a:

$$f(X) = a.$$

В целях упрощения записи часто символ функции f перед символом исполнительного элемента X опускается, тогда логическая функция записывается так:

$$X = a.$$

Далее всюду используется такая упрощенная форма записи функций. Если в словесном высказывании говорится, что элемент X должен сработать при срабатывании элементов A и B, то логическая функция записывается как произведение соответствующих переменных:

$$X = a \cdot b.$$

Если в словесном высказывании говорится, что элемент X должен сработать при срабатывании элементов A или B, то логическая функция будет иметь вид:

$$X = a + b.$$

Если в словесном высказывании говорится, что элемент X должен сработать при несрабатывании элемента A, то в логическую функцию записывается инверсный символ $\bar{a}$:

$$X = \bar{a}.$$

Простейшие логические элементы, реализующие четыре последние функции, носят соответственно названия: повторитель, элемент И, элемент ИЛИ, элемент НЕ.

Рис. 7.1. Схема элемента И

Рис. 7.2. Схема элемента ИЛИ

Рассмотрим некоторые принципиальные схемы простейших логических элементов.

На рис. 7.1 приведена схема диодного логического элемента И для отрицательных потенциалов, т. е. за 1 принимается потенциал $-E_к$, за 0 — потенциал корпуса. Схема имеет два входа: a и b, на которые в исходном состоянии подаются нулевые потенциалы (потенциал корпуса), диоды открыты и на выходе также будет нулевой потенциал. Если на один из входов будет подан потенциал $-E_к$, то его диод закроется, однако на выходе сохранится нулевой потенциал, так как другой диод будет открыт. Только при подаче на оба входа потенциала $-E_к$ (1) оба диода закроются и на выходе будет потенциал $-E_к$ (1). Эта схема реализует функцию логического умножения $a \cdot b$.

Следует обратить внимание на то, что если за исходное состояние принять наличие на обоих входах потенциалов $-E_к$, то на выходе схемы будет потенциал $-E_к$, который условно следует считать соответствующим сигналу 0. Если на один из входов подать более положительный потенциал корпуса (0 В), то соответствующий диод откроется и на выходе появится этот более положительный потенциал (0 В), который будет условно соответствовать 1, т. е. для положительных потенциалов схема будет реализо-

вывать логическую функцию ИЛИ. Поэтому часто аналогичную диодную схему называют элементом И, ИЛИ.

Чтобы ликвидировать указанную двойственность в действии логических элементов и внести определенность в логику действия дискретных схем, принимают за логический 0 меньший, а за логическую 1 больший потенциалы по абсолютному значению. В соответствии с этим промышленностью выпускаются серии элементов положительной или отрицательной логики, которые срабатывают соответственно

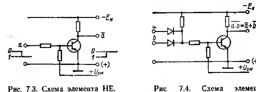


Рис. 7.3. Схема элемента НЕ.

Рис. 7.4. Схема элемента И-НЕ.

только от положительных или только от отрицательных потенциалов (импульсов).

На рис. 7.2 представлена схема логического элемента ИЛИ для отрицательных потенциалов, реализующая функцию $a+b$. Чтобы на выходе появился отрицательный потенциал $-E_к$ (1), достаточно подать потенциал $-E_к$ хотя бы на один из входов a или b.

Схема логического элемента НЕ представлена на рис. 7.3. В исходном состоянии на вход a подается потенциал корпуса (0), транзистор закрыт напряжением смещения $U_{см}$, на выходе схемы потенциал $-E_к$ (1). При подаче на вход a отрицательного потенциала (1), транзистор открывается, а на выходе появляется потенциал корпуса (0). Схема реализует функцию $\bar{a}$.

Более сложной схемой является схема логического элемента И-НЕ, представленная на рис. 7.4. В исходном состоянии на оба входа подается потенциал корпуса (0), транзистор закрыт напряжением смещения, на выходе схемы потенциал $-E_к$ (1). При подаче на оба входа отрицательных потенциалов (1) транзистор открывается, а на выходе появляется потенциал корпуса (0). Схема реализует функцию $\overline{a \cdot b}$. Тождественная ей функция $\bar{a}+\bar{b}$ указывает

Таблица 7.1

Логический элемент	Реализуемая функция	Номер рисунка
Повторить	a	Рис. 7.5, *а*
И	$a\cdot b$	Рис. 7.5, *б*
ИЛИ	$a+b$	Рис. 7.5, *в*
НЕ	$\bar{a}$	Рис. 7.5, *г*
И-НЕ	$\overline{a\cdot b}=\bar{a}+\bar{b}$	Рис. 7.5, *д*
ИЛИ-НЕ	$\overline{a+b}=\bar{a}\cdot\bar{b}$	Рис. 7.5, *е*
Запрет	$\bar{a}\cdot b$	Рис. 7.5, *ж*

Рис. 7.5. Графические символы логических элементов.

на то, что если хотя бы на одном из входов будет сигнал, соответствующий потенциалу корпуса (0), то транзистор остается закрытым и на выходе схемы будет потенциал $-E_к$ (1).

Наиболее распространенными логическими элементами являются также следующие: ИЛИ-НЕ (элемент НИ...НИ), реализующий функцию $\overline{a+b}=\bar{a}\cdot\bar{b}$, и ЗАПРЕТ, реализующий функцию $\bar{a}\cdot b$.

На рис. 7.5 представлены графические символы, при помощи которых логические элементы, перечисленные в табл. 7.1, изображаются в функциональных схемах.

Логические элементы И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ могут иметь число входов больше, чем в приведенных примерах.

7.3. ТРИГГЕРЫ

Триггер представляет собой устройство с двумя устойчивыми состояниями и является по существу запоминаю-

щим устройством, способным сохранять поступившую на его входы информацию (значение сигнала 0 или 1) в течение времени, пока сохраняется номинальным напряжение питания. Обычно триггер имеет два взаимно инверсных выхода, обозначаемых Q и $\overline{Q}$. Состояние, когда на выходе Q сигнал имеет значение 0 ($q=0$, а $\overline{q}=1$), принимается за нулевое состояние триггера; при $q=1$ ($\overline{q}=0$) состояние триггера принимается за единичное.

Выполнение триггеров на интегральных микросхемах позволило получить целый ряд триггеров с различными алгоритмами функционирования. По способу функционирования триггеры подразделяются на две группы: асинхронные и синхронные (тактируемые).

В асинхронных триггерах изменение состояний осуществляется непосредственно с поступлением сигналов на их входы. Эти входы в асинхронных триггерах, таким образом, являются информационными.

Синхронные триггеры кроме информационных входов имеют еще вход синхронизации (C-вход). Изменение состояния синхронных триггеров может происходить в соответствии с сигналами на информационных входах только при подаче тактирующего импульса на C-вход. Обычно тактирующие импульсы подаются от специального генератора импульсов, общего для всего дискретного устройства, в котором используются синхронные триггеры. Действие такого устройства будет происходить последовательно по тактам, длительность каждого такта, а следовательно, быстродействие устройства, будет определяться параметрами (настройкой) генератора импульсов.

Для асинхронного триггера промежуток времени нахождения его в каком-либо устойчивом состоянии также можно считать тактом его действия. Длительность такта определяется промежутком времени между моментами подачи различных сигналов на информационные входы триггера, а минимальная длительность такта определяется внутренними параметрами самой триггерной схемы (временем ее переключения).

Рассмотрим работу наиболее распространенных триггеров: асинхронных типов RS, T, JK и синхронного типа D. Их графические изображения в функциональных схемах устройств показаны на рис. 7.6.

RS-триггер имеет два информационных входа (рис. 7.6, *а*). Вход S служит для установки триггера в со-

стояние 1, а вход R — в состояние 0. При одновременной подаче на оба входа нулевых значений сигналов состояние триггера не изменяется, он сохраняет предыдущее состояние. При одновременной подаче на оба входа единичных значений сигналов состояние триггера не определяется, т. е. равновероятны его переходы или в нулевое, или в единичное состояние. Поэтому для нормальной работы дискретных устройств на базе RS-триггеров надо исключать одновременную подачу единичных сигналов на оба входа, что выражается условием $rs=0$.

Рис. 7.6. Графические символы триггеров.

Алгоритм функционирования RS-триггера может быть представлен в виде таблицы состояний (табл. 7.2).

В соответствии с таблицей состояний функционирование RS-триггера может быть выражено характеристическим уравнением в виде системы двух логических функций:

$$Q^{n+1} = s^n + \overline{r^n} \cdot Q^n; \; r^n \cdot s^n = 0.$$

Т-триггер имеет один динамический счетный вход (рис. 7.6, *б*). T-триггер с прямым (неинверсным) динамическим входом изменяет свое состояние на противоположное всякий раз, когда на вход поступает сигнал единичного значения. Для динамического входа значение сигнала принимается за 1 в момент перехода потенциального сигнала из состояния, принятого за 0, в состояние 1. В остальные промежутки времени значение динамического сигнала принимается за 0.

Функционирование T-триггера представлено в виде таблицы состояний (табл. 7.3).

Таблица 7.2

Такт n		Такт $n+1$
R^n	S^n	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	1	1
1	0	0
1	1	Неопределенность

Таблица 7.3

Такт n	Такт $n+1$
T^n	Q^{n+1}
0	Q^n
1	$\overline{Q^n}$

Характеристическое уравнение T-триггера имеет вид:

$$Q^{n+1} = \overline{t^n} \cdot Q^n + t^n \cdot \overline{Q^n}.$$

Функционирование T-триггера с инверсным динамическим входом показано на рис. 7.12.

JK-триггер имеет два динамических входа (рис. 7.6, *в*). Вход J служит для установки триггера в состояние 1, а вход K — в состояние 0. Следовательно, входы J и K эквивалентны соответственно входам S и R в RS-триггере. В отличие от RS-триггера в JK-триггере допустима одновременная подача единичных значений сигнала на оба входа, при этом JK-триггер изменяет свое состояние на противоположное подобно T-триггеру.

Функционирование JK-триггера представлено в виде табл. 7.4.

Характеристическое уравнение JK-триггера записывается в виде

$$Q^{n+1} = j^n \cdot \overline{Q^n} + \overline{k^n} \cdot Q^n.$$

JK-триггер называют универсальным триггером, так как на его основе путем несложных внешних коммутационных изменений можно получить схемы, выполняющие функции RS-, T- и D-триггеров. Заметим, что практическое использование JK-триггеров относительно невелико.

D-триггер. Синхронный D-триггер имеет два входа (рис. 7.6, *г*). Вход D является информационным, а вход C — тактирующим. Изменение состояния триггера может происходить при подаче тактирующего импульса на вход C, при этом триггер занимает то состояние, которое предварительно было записано по входу D. Если состояние триггера в момент подачи тактирующего импульса соответствует записанному по входу D, то это состояние не изменяется.

Функционирование D-триггера представлено в табл. 7.5.

Таблица 7.4

Такт n		Такт $n+1$
J^n	K^n	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	1	0
1	0	1
1	1	$\overline{Q^n}$

Таблица 7.5

Такт n	Такт $n+1$
D^n	t^{n+1}
0	0
1	1

Характеристическое уравнение D-триггера имеет вид:

$$Q^{n+1} = d^n.$$

Рассмотренные выше триггеры типов RS, T и JK могут быть выполнены с дополнительными тактирующими C-входами и работать в синхронном режиме. Дальнейшее расширение функциональных возможностей триггеров достигается при введении еще одного управляющего V-входа для разрешения приема информации. Триггер, имеющий V-вход, будет работать в соответствии с его таблицей состояний, если предварительно подан сигнал 1 на V-вход. При нулевом значении сигнала на V-входе информация по другим входам триггера не принимается и триггер не изменяет своего состояния. Относительно широкое практическое применение в дискретных устройствах находят DV-триггеры.

7.4. КОМБИНАЦИОННЫЕ (ОДНОТАКТНЫЕ) СХЕМЫ

В однотактных схемах дискретного действия однократное воздействие на приемные элементы вызывает однократное изменение состояния выходных цепей, т. е. состояние выходных цепей определяется комбинацией состояний входных элементов.

Синтез однотактных схем наиболее просто можно производить непосредственно по словесному высказыванию условий срабатывания каждого исполнительного элемента схемы. В § 7.2 было показано, что утвердительному словесному высказыванию соответствует введение в логическую функцию прямой переменной, а отрицательному — инверсной. Союзу И соответствует знак умножения, а союзу ИЛИ — знак сложения.

Пусть, например, исполнительный элемент X должен сработать при срабатывании элемента A и несрабатывании элемента B и срабатывании элемента C или несрабатывании элемента D и срабатывании элемента E, тогда логическая функция для элемента X будет иметь вид:

$$X = a \cdot \bar{b} \cdot c + \bar{d} \cdot e.$$

Форма логической функции, когда она представляет собой сумму произведений переменных, называется *нормальной дизъюнктивной формой.*

Можно составить логические функции по условиям несрабатывания исполнительного элемента X. В этом случае

правила составления первоначальной логической функции будут иными. Проще всего пользоваться следующим правилом: при составлении первоначальной логической функции по условиям несрабатывании исполнительного элемента можно сначала составить функцию по тем же правилам, что и для условия срабатывания, а затем взять отрицание от всей полученной логической функции.

Если в однотактной схеме имеется несколько исполнительных элементов, то сначала составляются логические функции для каждого из них. Каждая такая логическая функция может быть сначала преобразована с целью ее упрощения (минимизации). Затем составляется общая логическая функция схемы как сумма функций для отдельных исполнительных элементов. В общей функции могут быть опять проделаны преобразования с целью ее окончательной минимизации.

Для выражения условий работы исполнительных элементов в однотактной схеме можно использовать различные формы табличных записей коммутационных изменений. Наиболее простой формой табличной записи действия однотактных схем является запись в виде так называемой таблицы соответствий. В этой таблице в каждой строке при помощи символов 0 и 1 записываются комбинации состояния входов схемы и соответствующие им состояния выходов.

Для каждого выхода состояние входов каждой из строк вводится в логическую функцию в виде произведения переменных, а произведения, полученные из различных строк, суммируются. Общая логическая функция всей схемы получается как сумма логических функций для отдельных выходов. По существу этот табличный метод мало отличается от метода составления логической функции непосредственно по словесному высказыванию действия исполнительных элементов.

Существует иной вид табличной записи условий работы каждого из исполнительных элементов однотактной схемы в виде так называемой карты Карно (Вейча). Карта Карно представляет собой четырехугольник, разделенный на элементарные квадраты, каждому из которых соответствует определенная комбинация всех входных переменных. Внутри каждого квадрата с помощью нуля или единицы записывается состояние рассматриваемого выхода (исполнительного элемента). Использование карты Карно позволяет производить первоначальную минимизацию логической функции в процессе ее составления.

Рассмотрим пример. Пусть требуется построить схему элемента защиты устройства телеуправления, который должен выдавать запрещающий сигнал в том случае, когда сигнал 1 появится более чем на одной из трех выходных цепей дешифратора. Если сигналы на выходных цепях дешифратора принять за входные переменные синтезируемой логической функции, то условия задачи могут быть сформулированы так: срабатывание элемента защиты, который является исполнительным элементом, должно осуществляться, когда любые две или все три переменные одновременно принимают значение 1. Карта логической функции трех переменных, отвечающая поставленным условиям, приведена на рис. 7.7.

a \ c, b	0, 0	1, 0	1, 1	0, 1
0	0	0	1	0
1	0	1	1	1

Рис. 7.7. Карта Карно.

Для минимизации синтезируемой функции в карте Карно выделяются контуры, охватывающие по две, четыре, восемь и т. д. единиц. Если какой-либо контур пересекает границы изменения одной или нескольких входных переменных, то для данного контура эти *переменные* в *логическую* функцию не вносятся. Выделяемые контуры могут между собой пересекаться, т. е. каждая из единиц может входить в несколько различных контуров.

Для карты, приведенной на рис. 7.7, можно выделить три контура по две единицы в каждом. Контур *1* пересекает границы значений переменной a, следовательно, эта переменная не оказывает влияния на состояния выходов, обозначенные в квадратах, которые охвачены этим контуром. Для контура *1* получим логическое выражение $b \cdot c$. Контур *2* пересекает границы значений переменной b, для него получим выражение $a \cdot c$. Аналогично для контура *3* получим выражение $a \cdot b$.

Общая логическая функция для элемента защиты будет иметь вид:

$$f = b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b = a \cdot (b + c) + bc =$$
$$= b \cdot (a + c) + a \cdot c = c \cdot (a + b) + a \cdot b.$$

Следует заметить, что практически карту Карно можно использовать только при небольшом числе входных переменных. Добавление каждой новой переменной удваивает число квадратов карты. Так, для трех переменных

(см. рис. 7.7) карта имела восемь квадратов, для четырех она будет иметь 16 квадратов, для пяти — 32 квадрата, для шести — 64 и т. д. Это ограничивает практическое применение карты Карно для синтеза дискретных схем.

При табличных методах синтеза дискретных схем иногда можно получить более простую логическую функцию, если внести в таблицу так называемые безразличные состояния, т. е. такие комбинации входов, при которых по условиям работы схемы будет безразлично, что на выходе — 0 или 1. Такие состояния выходов в исходных таблицах соответствия и картах Карно отмечаются прочерками, заменяемыми затем в процессе синтеза схемы 0 или 1.

Рассмотрим примеры синтеза схем некоторых типовых узлов устройств телемеханики.

Пример 1. Синтезировать схему декодера (дешифратора) для кода на одно сочетание C_5^2, в котором исполнялись бы только неискаженные комбинации (любая искаженная комбинация приводила бы к защитному отказу).

Найдем число выходных цепей декодера:

$$C_5^2 = \frac{5 \cdot 4}{1 \cdot 2} = 10.$$

Обозначим выходы символами $X_1, ..., X_{10}$, а входные двухпозиционные элементы, на которых запоминаются принятые комбинации кода, — буквами A, B, C, D, E. Тогда для выхода X_1 можно записать, что он срабатывает (на выходе будет сигнал 1), если срабатывают элементы A и B и не срабатывают элементы C и D и E. Логическая функция будет иметь вид:

$$X_1 = a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e}.$$

Аналогично для остальных выходов логические функции запишутся так:

$$X_2 = a \cdot \bar{b} \cdot c \cdot \bar{d} \cdot \bar{e}; \; X_3 = a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot d \cdot \bar{e}; \; X_4 = a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot e;$$
$$X_5 = \bar{a} \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot \bar{e}; \; X_6 = \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} \cdot d \cdot \bar{e}; \; X_7 = \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot e;$$
$$X_8 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c \cdot d \cdot \bar{e}; \; X_9 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c \cdot \bar{d} \cdot e; \; X_{10} = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot d \cdot e.$$

Нетрудно заметить, что каждая из этих десяти логических функций может быть реализована при помощи диодной схемы, аналогичной схеме на рис. 7.1, но имеющей пять входов, два из которых являются прямыми и три — ин-

версными. Полная схема для всех десяти выходов представлена на рис. 7.8.

В исходном состоянии на верхних горизонтальных шинах всех триггеров нулевой потенциал, а на нижних отрицательный. Через все ограничивающие резисторы протекает ток, и на всех выводах X_1—X_{10} нулевой потенциал

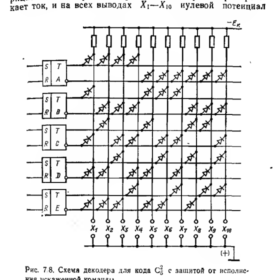


Рис. 7.8. Схема декодера для кода C_5^2 с защитой от исполнения искаженной команды.

(сигнал 0). По схеме легко проследить, что при срабатывании любых двух из пяти триггеров на соответствующем одном выходе появится отрицательный потенциал (сигнал 1 при отрицательной логике). Например, при срабатывании триггеров A и B сигнал 1 появится на выходе X_1.

Если срабатывают сразу три триггера или более (принята искаженная комбинация), то сигнал 1 не появится ни

на одном из выходов, т. е. декодер, выполиенный в виде диодной матрицы по схеме на рис. 7.8, будет выдавать сигнал 1 на одном из выходов только прн неискаженной комбинации кода.

Пример 2. Синтезировать схему декодера для кода на одно сочетание C_5^2, в котором исполиялись бы неискаженные комбинации, а в отношении искаженных комбннаций никаких ограннчений не ставится. Прн этом условии логические функции выходов запишутся следующим образом:

Рис 7.9 Схема декодера для кода C_5^2 без защиты от исполнения искаженной команды.

$$X_1 = a \cdot b; \quad X_2 = a \cdot c; \quad X_3 = a \cdot d; \quad X_4 = a \cdot e;$$
$$X_5 = b \cdot c; \quad X_6 = b \cdot d; \quad X_7 = b \cdot e; \quad X_8 = c \cdot d;$$
$$X_9 = c \cdot e; \quad X_{10} = d \cdot e.$$

Логические функции X_1—X_{10} реализуются схемой на рис. 7.9, в которой число диодов меньше, чем в схеме на рис. 7.8. В исходном состоянии на всех выходах X_1—X_{10} будет также сигнал 0. При срабатывании любых двух триггеров из пяти на соответствующем выходе также появляется сигнал 1. Но если одновременно срабатывают сразу три триггера или более (искаженная комбинация), то сигнал 1 появится одновременно на нескольких выходах. Так, при срабатывании триггеров A, B и C сигнал 1 одновременно будет на выходах X_1, X_2 и X_5, т. е. диодная матрица не реализует защитные свойства кода на одно сочетание.

7.5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТНЫЕ (МНОГОТАКТНЫЕ) СХЕМЫ

В последовательностных схемах дискретного действия изменение значений сигналов на входах и выходах происходит по определенной заданной последовательности во времени. Полный цикл работы последовательностной схемы можно разбить на ряд промежутков времени, являющихся тактами ее работы. Тактом работы схемы называется промежуток времени изменения состояния хотя бы одного из ее элементов.

При построении последовательностных схем можно составить таблицы состояний элементов в каждом из тактов. Сопоставляя между собой таблицы состояний, можно составить таблицы переходов от одного такта к другому, а также диаграммы (графы) состояний и переходов. Разработаны различные виды таблиц и диаграмм и методы составления по ним логических функций и схем. Однако все эти методы очень громоздки и практически трудно реализуются. Кроме того, в схемах, построенных на основании такого абстрактного синтеза, длительность тактов будет определяться внутренними временными параметрами элементов, и на работу схемы будет существенно влиять явление их «состязания», при котором нестабильность временных параметров элементов может приводить к случайным комбинациям их состояний и нестабильности работы всей схемы.

Поэтому наибольшее распространение получили тактируемые последовательностные схемы, в которых длительность тактов задается специальным генератором импульсов. Обычно длительность всех тактов работы схемы одинакова и выбирается так, чтобы за время такта заканчивались

все возможные в схеме переходные процессы при переключении ее элементов. Если в схеме использовать распределитель импульсов с числом выходов по числу требуемых тактов ее работы, то синтез последовательностной схемы сводится к синтезу комбинационных схем в каждом из тактов.

В тактируемых последовательностных схемах наряду с логическими элементами особенно широко используются триггерные схемы.

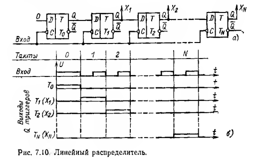


Рис. 7.10. Линейный распределитель.

а — функциональная схема; *б* — временная диаграмма.

Ниже рассматриваются некоторые типовые узлы устройств телемеханики, представляющие собой тактируемые последовательностные схемы.

Линейный распределитель. В распределителе этого типа каждая триггерная ячейка имеет внешний выход, число ячеек (выходов) равно числу переключаемых (считываемых) импульсов, поэтому его называют еще распределителем с непосредственным отсчетом импульсов. Такой распределитель по существу представляет собой сдвигающий регистр, в котором при каждом поступающем на вход импульсе предварительно записанная единица сдвигается на соседний выход.

Наиболее просто схема линейного распределителя реализуется на D-триггерах. На рис. 7.10, *а* показана схема, а на рис. 7.10, *б* — диаграмма работы распределителя на

D-триггерах с инверсным динамическим входом C. Триггер T_0 является подготовительным; перед началом действия распределителя он устанавливается в единичное состояние, например, по дополнительному S-входу, который на схеме не показан; все остальные триггеры находятся в нулевом состоянии. В этом состоянии схемы с выхода Q триггера T_0 подается сигнал 1 на вход D триггера T_1, а на входы D всех остальных триггеров подаются сигналы 0. В первом такте

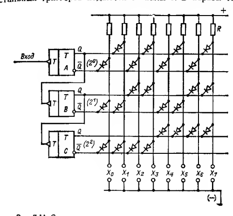


Рис. 7.11. Схема матричного распределителя.

(при первой паузе, поступающей на C-выходы всех триггеров) триггер T_1 переходит в единичное состояние, а T_0 — в нулевое; все остальные триггеры сохраняют свое нулевое состояние. Далее сигнал 1 подается с выхода Q триггера T_1 на вход D триггера T_2, поэтому во втором такте триггер T_2 переходит в единичное состояние, а T_1 — в нулевое и т. д., как показано на рис. 7.10, *б*.

Матричный распределитель. Распределитель этого типа состоит из двоичного счетчика и диодной матрицы. Наиболее просто схема двоичного счетчика может быть реализована на T-триггерах.

На рис. 7.11 показана схема матричного распределителя, составленного из 3-разрядного двоичного счетчика и соответствующей диодной матрицы. Счетчик реализован на T-триггерах с инверсными входами. Диаграмма работы распределителя показана на рис. 7.12.

В исходном состоянии схемы (нулевой такт) триггеры A, B и C находятся в нулевом состоянии. В первом такте (по срезу импульса исходного состояния) триггер A переходит в единичное состояние. Во втором такте (по срезу первого импульса) триггер A возвращается в нулевое состояние. В третьем такте триггер A снова переходит в единичное состояние, а в четвертом возвращается в нулевое и т. д. Так как с выхода Q триггера A сигнал подается на T-вход триггера B, последний изменяет свои состояния каждый раз по срезу импульса, поступающего с выхода Q триггера A. Аналогично взаимосвязаны в работе триггеры C и B.

Как видно из диаграммы на рис. 7.12, пройдя все возможные сочетания состояний триггеров, после седьмого такта схема возвращается в исходное состояние и восьмой такт является нулевым тактом нового аналогичного цикла ее работы.

Если принять, что состояния триггеров выражают значения разрядов двоичных чисел (триггер $A-2^0$, $B-2^1$, $C-2^2$), то комбинации состояний триггеров в порядке возрастания номеров тактов будут выражать последовательный ряд двоичных чисел (000, 001, 010, 011, ... 111). Поэтому рассмотренная схема носит название *двоичного счетчика.*

Если с выходов триггеров двоичного счетчика подать сигналы на соответственно составленную диодную матрицу, то получим схему распределителя импульсов, работающего аналогично схеме на рис. 7.10, но не требующего предварительной записи единицы.

В схеме на рис. 7.11 диодная матрица составлена для положительной логики по следующим логическим функциям:

$$X_0=\bar{a}\cdot\bar{b}\cdot\bar{c};\quad X_1=a\cdot\bar{b}\cdot\bar{c};\quad X_2=\bar{a}\cdot b\cdot\bar{c};$$
$$X_3=a\cdot b\cdot\bar{c};\quad X_4=\bar{a}\cdot\bar{b}\cdot c;\quad X_5=a\cdot\bar{b}\cdot c;$$
$$X_6=\bar{a}\cdot b\cdot c;\quad X_7=a\cdot b\cdot c.$$

Функции $X_0, ..., X_7$ можно легко получить на основании временной диаграммы работы триггеров A, B, C двоичного счетчика.

В качестве примера рассмотрим синтез схемы с распределителем для преобразования последовательного двоичного кода в параллельный и запись (запоминания) принятой комбинации.

Для выделения качественных признаков импульсов принимаемого последовательного кода предусмотрим элемент A (дискриминатор качественных признаков), который реагирует только на один из двух возможных признаков, т. е.

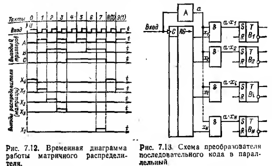


Рис. 7.12. Временная диаграмма работы матричного распределителя.

Рис. 7.13. Схема преобразователя последовательного кода в параллельный

выдает на выходе сигнал 1 при приходе импульса с избирающим признаком, и сигнал 0 с неизбирающим. В качестве запоминающих элементов используем RS-триггеры. Срабатывания запоминающих элементов $B_1, ..., B_N$ будут разделены по времени сигналами с выходов $X_1, ..., X_{N0}$ распределителя RG, который переключается по мере приема импульсов последовательного кода.

Условие работы каждого i-го запоминающего элемента будет условием работы комбинационной схемы. i-й элемент B_i должен сработать при срабатывании элемента A и i-го выхода (i-й ячейки) распределителя RG. Логическая функция в этом случае имеет вид:

$$B_i = a \cdot x_i.$$

Функциональная схема, реализующая указанные условия, изображена на рис. 7.13.

Промышленностью выпускается большое число различных серий микросхем, содержащих различные наборы логических элементов, триггерных схем и других функциональных элементов. В микросхемотехнике наблюдается тенденция ко все большей степени интеграции изделий. Рассмотренные в данной главе принципы построения схем дискретного действия применяются как при создании устройств из элементов относительно малой степени интеграции, так и для внутренней организации функциональных узлов большей степени интеграции, включая большие интегральные микросхемы (БИС).

В ряде серий микросхем элементами традиционной схемотехники стали монолитные кодеры, декодеры, счетчики импульсов, распределители и регистры, в том числе реверсивные с последовательной, параллельной и комбинированной записью и считыванием информации.

Наибольшей степенью интеграции отличаются микропроцессоры, точнее, микропроцессорные наборы, содержащие оперативный блок, блок памяти, программный (управляющий) блок, а также дополнительные стандартные функциональные интегральные микросхемы. Использование методов логического проектирования способствует наиболее рациональному и эффективному применению микропроцессоров в различных областях дискретной схемотехники.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ПО ПЕРВОЙ ЧАСТИ КНИГИ

1. Приведите примеры сообщений дискретных по уровню во времени и по уровню и во времени одновременно.

2. Какого характера сообщения поступают от датчика температуры? Какие сообщения передаются в системе сигнализации о трех уровнях: «выше нормы», «в пределах нормы», «ниже нормы»? Как называется такая система?

3. Почему при телеизмерении необходимо передавать постоянную составляющую, а при передаче речи эта составляющая не передается? Чем отличается спектр телемеханических сообщений от спектра речи и спектра телевизионного сигнала?

4. Нарисуйте произвольную реализацию случайной непрерывной функции и произведите:

а) дискретизацию во времени;

б) квантование по уровню;

в) квантование по уровню и дискретизацию во времени.

5. Найдите число уровней квантования, при котором средняя квадратическая приведенная погрешность квантования: а) $\delta_{кв} \leqslant 1$ %; б) $\delta_{кв} \leqslant 0,2$ %.

6. Определите интервал временио́й дискретизации Δt при ступенчатой интерполяции и интерполяции с фильтром низких частот, если максимальная частота спектра сигнала от датчика равна 2 Гц.

7. Определите интервал временно́го квантования Δt в трехканальной системе с временным разделением, если максимальные частоты спектров от датчиков равны соответственно 0,5; 2 и 5 Гц. Интерполяция осуществляется с помощью фильтра низких частот.

8. Нарисуйте спектр периодической последовательности импульсов постоянного тока (видеоимпульсов) с $\tau = 1$ мс и $T=5$ мс. Определите ширину спектра. Нарисуйте спектр и определите ширину спектра, если этими видеоимпульсами прямоугольной формы промодулировать по амплитуде несущую частоту $f_0 = 10$ кГц.

9. Определите ширину спектра сигнала в многоканальной системе с временным разделением каналов и модуляцией типа АИМ—ЧМ, если время цикла $T_ц = 200$ мс, а девиация частоты $f_д = 200$ Гц, число каналов $N=10$, скважность многоканального сигнала $Q=1$. При решении задачи найдите сначала ширину спектра сигнала АИМ через длительность одного импульса, затем, считая, что максимальная частота спектра этого сигнала, являющегося модулирующим для ЧМ, равна $F_М = \Delta F = 1/\tau_{min}$, определите ширину спектра сигнала ЧМ по формуле

$$\Delta F_{ЧМ} = 2\,(F_М + f_д).$$

10. Нарисуйте структурную схему системы с частотным разделением по поднесущим и модуляцией типа ЧМ—АМ. Нарисуйте спектр сигналов до и после второго модулятора при условии, что на входы системы от датчиков поступают синусоидальные сигналы с частотой $F_М = 2$ Гц, а девиация частоты на поднесущих составляет 10 % поднесущих.

11. Напишите комбинации кода C_n^2 с временны́м разделением элементов и этого кода с инверсным повторением (с заменой 1 на 0 и 0 на 1 при повторной передаче — $n=5$). Определите минимальное и максимальное кодовые расстояния d.

12. Запишите число 75 в двоичном и двоично-десятичном кодах. Определите избыточность этих кодовых комбинаций

и как изменится избыточность, если будут передаваться 3-разрядные десятичные цифры?

13. Найдите относительную скорость передачи информации $R_F = R/\Delta F = I/\Delta FT$ для двоичного и двоично-десятичного кодов при скважности $q=2$; 1 и амплитудных признаках (наличие и отсутствие импульсов).

14. Нарисуйте эквивалентную схему участка проводной линии связи и объясните с помощью этой схемы различие в значениях и зависимостях затухания и волнового сопротивления от частоты в воздушных и кабельных ЛС. Каковы области применения тех и других линий?

15. Объясните, для чего применяются биметаллические проводные линии? Сравните их частотные характеристики с частотными характеристиками медных проводных линий.

16. Найдите уровень сигнала $u=20$ мВ в децибелах и неперах на сопротивлении $R=200$ Ом.

17. Задайтесь графически зависимостью затухания α от частоты, например, в виде затухающей по экспоненте зависимости и найдите спектр периодической последовательности импульсов на выходе линии, если на входе линий импульсы имеют прямоугольную форму. Как исказится форма прямоугольных импульсов при прохождении по такой линии? Нарисуйте форму импульсов.

18. Рассчитайте вероятность перехода кодовой комбинации 1011 в кодовую комбинацию 1101, если известны вероятности $P(1\to 0)=\alpha$ и $P(0\to 1)=\beta$; $\alpha \ll 1 \gg \beta$. Ошибки независимы.

19. Определите вероятность возникновения необнаруженной ошибки в двоичном неизбыточном коде с повторением и проверкой на идентичность. Число передаваемых команд $M=4$, вероятности ошибок $P(1\to 0)=P(0\to 1)=5\cdot 10^{-3}$.

20. Определите вероятность возникновения необнаруженных ошибок в распределительном коде $n=4$ с временным разделением элементов, предназначенным для передачи четырех команд ($M=4$) при $P(1\to 0)=P(0\to 1)=10^{-4}$.

21. Найдите вероятность правильного приема в коде с защитой на четность длины $n=5$ при $P(1\to 0)=P(0\to 1)=\alpha\ll 1$.

22. Определите число обнаруживаемых ошибок в коде с $d_{min}=5$, имеющем семь информационных и восемь проверочных символов, и определите вероятность возникновения необнаруженной ошибки при $P(1\to 0)=P(0\to 1)=10^{-3}$.

23. Определите количество информации, получаемой за

один цикл от источника с двумя состояниями при вероятности нулевого состояния $P(0)=2^{-3}$.

24. Объясните принципы построения циклического кода и его основные характеристики.

25. Объясните принцип построения рекуррентного кода и сравните его с другими корректирующими кодами.

26. В чем заключается различие между временным циклическим разделением и временным кодовым разделением сигналов? Какие их целесообразные области применения?

27. Объясните, почему коэффициент иерархии при радиальной структуре линии связи меньше, чем при кустовой структуре?

28. В чем заключается основное различие в структурах линий связи телемеханических комплексов при информационно-недогруженных линиях и при интенсивной их нагрузке.

29. Упростите (минимизируйте) логическую функцию $f=(a\cdot\bar{x}\cdot b+y\cdot\bar{c}+\bar{b}\cdot\bar{y}\cdot d)\,(\overline{c+\bar{y}})$.

30. Составьте логическую функцию для исполнительного элемента X, который должен сработать при срабатывании элемента A и несрабатывании элемента B или при срабатывании элемента B и несрабатывании элемента C и срабатывании элемента D. По составленной логической функции начертите соответствующую функциональную схему.

31. Составьте логическую функцию для исполнительного элемента X, который должен не сработать при срабатывании элемента A и несрабатывании элемента B и срабатывании элемента C или несрабатывании элемента D и срабатывании элемента E. Произведите возможные преобразования полученной логической функции (до и после ее преобразования), начертите соответствующие функциональные схемы.

32. Синтезируйте аналитически (при помощи составления логических функций) схему декодера для 3-разрядного ($n=3$) кода Грея. По составленным логическим функциям начертите схему декодера в виде диодной матрицы.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

8.1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ

Этот параграф имеет вводный характер для процессов и систем.

Информационной системой называется совокупность устройств и каналов связи с протекающими в ней процессами генерирования, сбора, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

В отличие от информационных систем в энергетических, механических и тепловых системах основными являются соответственно энергетические, механические и тепловые процессы.

Все автоматизированные информационные системы (АИС) имеют один, несколько или множество источников и получателей информации и различных устройств для промежуточного преобразования передачи, обработки и хранения информации. Автоматизированные информационные системы имеют определенные структуры, характерные алгоритмы функционирования (последовательности действия), перерабатывают и передают определенное количество информации и могут занимать пространство с определенной конфигурацией и объемом. Целевая функция, информационная емкость и возможности информационной системы изменяются в очень широких пределах, например от простейшей одноканальной системы для телеизмерения одного параметра (скорости, давления и т. п.) до человеческого общества, которое также можно отнести к очень сложной информационной системе.

Произвольно выбранная информационная система разделяется на ряд подсистем, выполняющих более простые функции. В каждой из них протекает несколько или определенное множество простейших информационных процессов,

Так, информационный процесс разговора двух абонентов по телефону разделяется на цепочку последовательно включенных более простых процессов: генерирование речевой информации абонентом, преобразование звуковых колебаний в электрический ток микрофоном, передача сообщения на расстояние по каналу связи, преобразование электрических колебаний в звуковые в телефонной трубке на приемной стороне и прием (получение) речевой информации вторым абонентом.

Аналогичный информационный процесс происходит при телевизионной передаче. Здесь также участвуют зрительные органы человека и добавляются преобразования изображения в электрические колебания в кинескопе или другой телевизионной трубке на передающей стороне и обратные преобразования в кинескопе на приемной стороне. Схема передачи и приема телеизмерений аналогична: первичным преобразователем (датчиком) на передающей стороне может служить первичный измерительный прибор, а воспроизводящим устройством — выходной измерительный (вторичный) прибор на приемной стороне.

На рис. 8.1 дан пример упрощенной структурной схемы АИС для производственного процесса или научных исследований.

Информационные процессы — основная характерная особенность любой информационной системы, и при заданной структуре они полностью определяют ее функционирование. Из простейших процессов получают более сложные путем последовательного, параллельного, веерообразного, иерархического и комбинированного соединений (см. гл. 6). В результате образуется определенная структура процессов. К очень сложным информационным процессам относится управление крупным производственным комплексом, отраслью промышленности, государством.

Произвольно выбранный информационный процесс, даже самый сложный, происходит в рамках определенной системы, которая, как отмечалось ранее, разделяется на ряд более простых подсистем с протекающими в них более простыми процессами или имеющих более простые структуры. Следовательно, информационные процессы (перечень, их характеристики и их структура) определяют построение любой информационной системы.

Источниками и приемниками информации могут быть человек, ЭВМ и другие разнообразные устройства: сбора, распределения и поиска информации, промежуточных пре-

образований (кодирование, декодирование и др.), для считывания с записи, для передачи и воспроизведения информации. В табл. 8.1 даны примеры простейших информационных процессов и образования из них более сложных процессов.

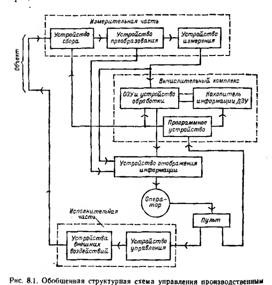


Рис. 8.1. Обобщенная структурная схема управления производственным или другим процессом.

Ограничимся рассмотрением информационных систем, применяемых в народном хозяйстве.

В АИС различного назначения протекают многие общие процессы первичного отбора, сбора, передачи, распределения, обработки и хранения информации.

Таблица 81

Группа процессов и АИС	Назначение процессов и АИС	Последовательность более простых процессов
Простейшие процессы	Первичный отбор, запись, считывание, модуляция, передача по линии связи, демодуляция, хранение (и памяти), воспроизведение (на индикаторе) и др.	—
Измерительные преобразования	Нелинейные преобразования, линеаризация, сравнение с мерой, масштабирование, деление и умножение частот и интервалов времени, квантование, кодирование, декодирование и др.	—
Простейшие системы	Кварцевые и другие часы	Источник информации (стабильный генератор) — деление частот — стрелочный или цифровой индикатор времени (часов, минут, секунд)
	Электрический расходомер жидкости и газа	Первичный преобразователь расхода с электрическим выходом — миллиамперметр (указатель расхода)
	Другие измерительные приборы	Первичный преобразователь — измерительные преобразования — индикатор или указатель измеряемого параметра
Передача и хранение информации	Передача информации на расстояние	Модуляция — передача по линии связи — демодуляция
	То же	Квантование — кодирование — модуляция — передача по линии связи — демодуляция — декодирование
	Хранение информации	Запись на магнитном и другом носителе — запоминание (память) — считывание информации
	То же	Квантование — кодирование — запись на носителе — память — считывание — декодирование
Системы телемеханики	Телеуправление по программе	Считывание программы с магнитной или другой ленты — передача по линии связи — демодуляция — исполнение команд объектами управления
	Автоматический опрос телеизмерений или первичных преобразователей	Вызов первичных преобразователей по программе — передача по каналу связи — сравнение с уставками — регистрация параметров телеизмерений и результатов их сравнения с уставками

Автоматизированные информационные системы делятся на системы, выполняющие определенные функции, и системы, имеющие специфические информационные особенности.

Информационно-измерительные системы (ИИС) осуществляют первичный отбор и сбор информации от первичных преобразователей, измерительные преобразования и представление измеряемой информации (сравнение с мерой, масштабирование, линеаризация, коррекция погрешностей).

Измерительные системы (ИС) разделяются на два класса: **прямых измерений и статистических измерений**. Системы для прямых измерений в свою очередь разделяются на сканирующие, многоточечные и одноканальные высокоточные системы измерений. Сканирующие системы, например, измеряют поле температур в двигателях и другие поля. Многоточечные системы осуществляют измерение одинаковых или различных параметров во многих точках, число которых достигает 10^4 (для научных исследований и управления производственными процессами). К высокоточным относятся системы измерения интервалов времени и других параметров с погрешностью менее 0,1 %.

Статистические измерительные системы относятся к системам косвенных измерений. Они включают в себя системы для измерения параметров распределения вероятностей случайных процессов, корреляционные и другие измерительные системы.

Системы автоконтроля (САК) устанавливают соответствие между состоянием объектов и заданной нормой с целью суждения о функционировании объектов в настоящее время и в будущем (прогнозирующий контроль). *В отличие от измерений при автоконтроле производится сравнение контролируемой величины не с мерой, а с установленной нормой* и нет необходимости знать численные значения контролируемой величины. Задается только сравнительный допуск на отклонение от заданной нормы, и этот допуск (5, 10 % и более) значительно превышает погрешность измерительных систем. Таким образом, при автоконтроле осуществляется сжатие информации.

Для системы автоконтроля характерны такие процессы, как первичный отбор информации первичными преобразователями, сравнение с заданной нормой и формирование сигналов об отклонении от нормы на заданные допуски.

Системы автоконтроля разделяются на две группы: для контроля большого числа параметров и для контроля одного или нескольких параметров, но с большим объемом обработки информации для формирования сигнала об отклонении от заданной нормы (например, статистическая обработка результатов контроля).

Системы технической диагностики (СТД) предназначаются для обнаружения неисправностей (отказов) и их местоположения в работе технических устройств и более крупных комплексов (объектов). В отличие от близких к ним систем автоконтроля здесь ставятся более сложные задачи контроля за отклонениями от нормы не отдельных параметров, а качества функционирования контролируемого объекта. Наиболее развита теория диагностики объектов, у которых каждый элемент может быть только в двух состояниях: исправном и неисправном (1 или 0). Состояние объекта определяется путем проверок по диагностическим программам или тестам.

Системы технической диагностики выполняются либо в виде конструктивно выделенных установок, например, для обнаружения неисправностей в двигателях внутреннего сгорания, либо совмещенно с другими информационными системами. Большинство современных информационных систем, в том числе и системы телемеханики, имеют совмещенные с ними устройства или подсистемы технической диагностики.

Системы распознавания образов (СРО) предназначаются для установления соответствия между исследуемым объектом и заданными образами. Из большого разнообразия возможных образов в технических системах ограничиваются образами, характеризующимися параметрами, которые можно определить и измерить. Частными случаями таких образов могут быть определенные геометрические фигуры, например, самолета, судна и т. п.

Задача распознавания заключается в сравнении по определенным признакам эталонного образа с исследуемым объектом. Системы распознавания образов во многих случаях выполняют функции, аналогичные функциям технической диагностики, и имеют близкие структурные схемы.

Системы телесигнализации (ТС) выполняют функции сигнализации на расстояние о состоянии или положении объектов контроля. Они относятся к наиболее массовым информационным системам. Число только двухпозиционных контролируемых объектов охранной и пожарной

сигнализации в действующих системах ТС в СССР превышает миллион и быстро возрастает. В связи с развитием в народном хозяйстве диспетчеризации быстро возрастает число систем сигнализации об обеспеченности рабочих мест материалами, инструментом и об их функционировании.

Системы телеизмерения (ТИ) выполняют функции автоматического измерения на расстоянии через канал связи. Они состоят из первичных преобразователей, передающего устройства для преобразования сигнала с первичного преобразователя в сигнал, пригодный для передачи по каналу связи, приемного устройства, преобразующего принимаемый сигнал, измерительных преобразователей и устройств отображения.

Системы телеуправления — телесигнализации (ТУ—ТС) выполняют функции передачи команд управления и сигналов телесигнализации на расстояние. Они передают с пункта управления на объекты команды управления и в обратном направлении передают главным образом двухпозиционные сигналы с объектов (включено — выключено и т. п.). Передача команд и сигналов может осуществляться по программе. Предъявляются высокие требования к достоверности (неискаженности) передачи команд и сигналов. С этой целью применяется ряд специальных методов повышения достоверности передачи сигналов.

Системы передачи данных (ПД) выполняют функции передачи на расстояние через канал связи цифровой или буквенно-цифровой информации. Такая отчетная или статистическая информация передается с пунктов ручного ввода с ЭВМ и для ЭВМ. Системы передачи данных промышленного применения могут работать совместно с системами телемеханики.

Системы информационного сопровождения (СИС) выполняют функции автоматического информационного сопровождения движущихся объектов или изделий (самолета, поезда, автобуса, металлического слитка в металлургических цехах и т. д.). Так, для каждого слитка необходимо в процессе его изготовления и доставки на склад автоматическое сопровождение информацией в количестве до 40 десятичных цифр. К системам информационного сопровождения транспорта предъявляются высокие требования к достоверности информации, отображаемой на диспетчерских пультах и дисплеях.

Системы единого времени (СЕВ) выполняют функции снабжения (обеспечения) единой информацией о точном времени и заменяют автономные часы, которые могут расходиться с течением времени. Так, автоматизированная электронная система единого времени типа СЕВЕНА выпускается в нескольких модификациях для различного применения и имеет специальные устройства для автоматической коррекции вторичных часов, питание и коррекция которых осуществляются, например, через силовую сеть переменного тока.

Информационно-управляющие системы (ИУС) предназначаются для управления промышленными объектами при сравнительно небольших расстояниях до них, например в пределах одного цеха. К таким системам относится, например, ЛИУС (локальная информационно-управляющая система).

Информационно-поисковые системы (ИПС) выполняют функции автоматического поиска нужной информации. Системы этого типа начинают все шире применяться на складах готовой продукции, полуфабрикатов, инструментов, архивных документов, в библиотеках, в массивах программ, алгоритмов и т. д.

При создании информационных сетей и систем происходит процесс, аналогичный начальной стадии становления энергетических сетей и систем (полвека назад). Создание информационных сетей и систем имеет революционный характер для всей страны. Если сейчас электроэнергия сетей, по существу, доведена до каждого человека на работе, в общественных местах и дома, то через несколько десятилетий информационное обслуживание сетями и комплексами также будет доведено до каждого человека. Это в большей степени, чем энерговооруженность, повысит эффективность функционирования каждого человека, каждой организации и предприятия. Кроме Государственной сети вычислительных центров (ГСВЦ) для верхних рангов иерархии создаются, например, сети телемеханики для нижних рангов иерархии на основе универсальных вычислительных телекомплексов (УВТК) с элементной базой четвертого поколения и встроенными микро-ЭВМ (см. § 19.5). В отличие от энергетических сетей с все более крупными электростанциями информационные сети и системы будут иметь ЭВМ с различными характеристиками на всех рангах иерархии, — от супер- до микро-ЭВМ.

Из сказанного выше следует необходимость целенаправленного развития науки об информационных процессах. На рис. 8.2 приведена классификация информационных процессов и систем народнохозяйственного назначения, которые на нижних рангах иерархии получают информацию

Технические информационные

Измерения, автоконтроль и техническая диагностика: первичный отбор, сбор информации, измерительные преобразования (линеаризация, масштабирование, преобразование координат, сравнение с мерой и нормой), статистические измерения и контроль, оптимизация погрешностей и допусков, локализация и прогнозирование неисправностей (ПВО, испытания крупных ракет, самолетов, космических объектов)

Распознавание образов: изучение объектов их моделей, классификация и формы представления (пространственная, временная, спектральная), методы распознавания и их реализация (образы на Земле со спутников, в астрономии, ситуации сложных производственных и других комплексов)

Передача и хранение: эффективность и помехоустойчивость, передача закодированных сообщений (концентрация, маршрутизация, буферная обработка, приоритеты, надежностные процедуры и др.), (спутниковые комплексы, единая система связи)

Информационное сопровождение: методы получения информации, безопасность движения, надежность и эффективность сопровождения (воздушный, железнодорожный транспорт)

Отображение информации: элементы отображения, модели отображения (технологические, на дисплеях, комбинированные), иерархия и динамика отображения, рекомендации инженерной психологии (спутниковые системы, системы ПВО)

Общие проблемы и процессы			
Модуляция и кодирование	Информационные структуры	Достоверность информации и надежность систем	Математическое и физическое моделирование

Рис. 8.2. Классификация технических (автоматизированных) информа

непосредственно от объектов измерения, контроля и управления и передают команды этим объектам непосредственно. Классификация выполнена по признаку информационных функций. В скобках даны примеры сложных процессов.

На более высоких ступенях (уровнях, рангах) иерархии

процессы (проблемы анализа и синтеза)

Поиск и распределение информации (в банках данных и в неорганизованных массивах):
методы и виды поиска, классификация и эффективное кодирование, поиск научной информации, виды распределения информации (поиск в крупных сетях ЭВМ, научные эксперименты)

Обработка информации:
иерархия обработки (элементов сообщений и более крупных блоков сообщений), производительность, достоверность обработки, многомашинная обработка (супер-ЭВМ, обработка в сетях ЭВМ)

Машинные учет, планирование, проектирование и обучение:
методы учета и планирования, оперативное, перспективное планирование, научное прогнозирование (статистическое управление, Госплан СССР),
методы, иерархия и эффективность проектирования, методы ввода и вывода информации из ЭВМ (проектирование самолетов, зданий),
методы обучения, самообучения и их эффективность (заочное образование и повышение знаний)

Автоматическое управление:
методы получения информации об объектах, стратегия и тактика управления при неполной информации, алгоритмизация процессов управления (космические объекты, сложные автоматы)

Функционирование сложных комплексов и сетей:
взаимодействие между элементами системы, жизнеспособность, эффективность систем защит, методы выхода из аварийных ситуаций и восстановления, виды ресурсов и маневрирование ими, методы самоорганизации и совершенствования (сети ЭВМ, крупные автоматизированные комплексы)

Логические и сложные операции	Классификация и языки	Алгоритмизация процессов	Многофункциональные комплексы и сети	Элементная база

ционных процессов (в скобках даны примеры сложных процессов)

в народном хозяйстве широко применяются и другие информационные системы и комплексы, у которых входная и выходная информация имеет характер документов. К таким системам и комплексам относятся различного типа АСУ (АСУП, ОАСУ и др.), а также системы для управления госкомитетами. Особый интерес представляют информационные сети с ЭВМ, получающие все более массовое внедрение (см. гл. 19).

8.2. ОБЩИЕ ЧЕРТЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ

Если проследить тенденции развития систем автоматизированного контроля, управления, измерения и других, то можно заметить, что наблюдается переход от автоматизации отдельных машин и агрегатов к более крупным автоматизированным комплексам в промышленности, на транспорте, при проведении экспериментальных исследований. Переход сопровождается увеличением числа и усложнением функций систем, т. е. возрастанием разнообразия информации и количества ее преобразований, усложнением обработки, увеличением информационной емкости, расширением выполняемых функций, повышением «интеллекта» системы, увеличением протяженности сетей связи для передачи информации.

Во всех областях народного хозяйства СССР возникает необходимость в комплексной автоматизации информационных процессов первичного отбора информации, сбора, обработки, передачи, хранения, поиска, отображения и т. д. Это позволяет создавать более совершенные и крупные системы с высокими показателями по эффективности, надежности, быстродействию, точности и т. д.

В настоящее время еще продолжается укрупнение автоматизированных информационных систем и образование многофункциональных иерархических, взаимосвязанных комплексов АИС с автоматическим обменом информацией как между ступенями иерархии, так и между АИС различного назначения. Усложняются структуры и поведение, а системы объединяются в сети.

Все системы разделяются по ступеням иерархии (международные, государственные, отраслевые, производственные и другие комплексы), по выполняемым функциям (информационно-измерительные, информационно-поисковые, информационно-управляющие и др.) и способам их приспособляемости (детерминированные, с адаптацией информационных процессов, с обучением, самоорганизующиеся, самосовершенствующиеся и т. д.). На рис. 8.2 и 8.3 приведены классификации информационных систем и процессов.

В народном хозяйстве СССР эксплуатируется много тысяч крупных систем с ЭВМ, десятки тысяч АИС средней сложности также с

ЭВМ (информационно-измерительных систем, автоконтроля, телемеханики и др.) и сотни миллионов простейших АИС с одним источником информации, преобразователями и устройствами отображения информации в виде часов и других измерительных приборов.

Информационные функции, системы и сети

Однородные функции

Выделение и преобразование сигналов

сбор, передача, распределение, запись, хранение, считывание, обработка, отображение

Комбинированные функции

Сигнализация и ТС, измерения и ТИ, автоконтроль и ТК, управление и ТУ, учет, информационное сопровождение, поиск информации, диагностика, распознавание, единого времени, обмен информацией (связь), измерение координат (радиолокация и радионавигация), обучение

Территориальность

Международные, государственные, республиканские, областные, районные, местные (локальные)

Способы приспособляемости

Детерминированные, рефлексные, адаптивные, обучающиеся, самоорганизующиеся, самосовершенствующиеся

Информационные области науки и техники

Автоматика и телемеханика, информационно-измерительная техника	вычислительная техника, автоматизированные системы управления (АСУ), информационные сети	Связь, радиолокация, радионавигация

Рис. 8.3. Классификация информационных систем и их функций.

Наблюдается тенденция обработки информации на ЭВМ и микропроцессорах не только в крупных, но также и в простейших АИС.

Примерно до 60-х годов в Советском Союзе и за рубежом занимались главным образом автоматизацией машин и технологических

процессов, относящихся к нижним ступеням иерархии. На XXIV съезде КПСС впервые указывалось на важность проведения в широком масштабе автоматизации на более высоких ступенях иерархии. Создание многих разнообразных АСУП и ОАСУ информационных сетей для более высоких ступеней иерархии управления знаменует переход к следующему этапу — автоматизации процессов, выполняемых управленческим аппаратом с освобождением его от рутинных операций.

Для всех разновидностей информационных устройств в системах телемеханики и передачи данных основной функцией является передача информации на расстояние (сбор, передача, обработка, распределение информации контроля и управления) при ограниченном числе и полосе пропускания каналов связи и при воздействии помех. Следовательно, они выполняют функции автоматической связи между объектами, человеком и ЭВМ, находящимися на расстоянии.

Характерные черты развития АИС можно проследить на примере систем телемеханики. На начальных этапах становления телемеханики как в СССР, так и за рубежом наблюдалось большое разнообразие методов передачи сигналов телеуправления, телесигнализации и телеизмерения при сравнительно небольшом суммарном числе сигналов в одной специализированной для данного применения системе ТИ или ТУ — ТС. Только в нашей стране были разработаны сотни различных специализированных по применению систем с различными методами передачи, объемом информации, принципами построения, характеристиками на основе различной элементной базы.

До 50-х годов такие системы создавались на основе релейно-контактных элементов и электронных ламп. Позже системы телемеханики стали строиться на основе бесконтактных магнитных, транзисторных и других элементов. Все эти системы были предназначены для работы с человеком-операторов, находящимся на ПУ. Информационная емкость систем быстро возрастала, и возникла целесообразность создания комплексных (многофункциональных) систем передачи сигналов ТУ, ТС и ТИ одним устройством, а в дальнейшем и для рассредоточенных объектов.

В конце 50-х годов требования к системам продолжали резко возрастать и расширяться, поэтому создание крупных систем специализированного применения каждый раз требовало все больших усилий и затрат времени, исчисляемого годами. Системы часто устаревали еще до пуска их в эксплуатацию.

Кроме того, возникали новые требования: нужно было обеспечить передачу производственно-статистической информации, работу систем совместно с ЭВМ, повысить достоверность передачи всей информации.

Пришлось искать более гибкие принципы построения систем, широко применять унификацию и типизацию, строить системы из типовых модулей, блоков и субблоков, существенно изменять подходы к пост-

роенно систем телемеханики, сокращать число различных методов передачи информации и при этом переходить к адресным и комбинированным системам, широкому использованию полупроводниковой и микроэлектронной техники.

Одновременно увеличивались разнообразие передаваемой информации и информационная емкость. Многие системы должны работать не только с контролируемыми объектами, сосредоточенными в одном пункте (пункт — пункт), но и с объектами, рассредоточенными вдоль типового канала любой конфигурации. Они должны отвечать требованиям МККТТ [60]. Аналогичные особенности развития наблюдаются и в других типах систем.

Наиболее сильное и все возрастающее влияние на развитие информационных систем оказывает применение цифровых вычислительных машин и микроэлектронной элементной базы. Системы должны работать не только с оператором, но и с ЭВМ, а в последнее время и с микропроцессорами, и микро-ЭВМ.

Продолжающаяся тенденция укрупнения АИС и создания сложных иерархических комплексов предопределила целесообразность разработки АИС, выполняющих комплекс функций. Такие информационные комплексы одновременно выполняют функции информационно-измерительные, информационно-управляющие, автоконтроля, информационно-поисковые, диагностические и работают на расстоянии (телемеханика) совместно с вычислительным центром и местными микропроцессорами и мини- или микро-ЭВМ.

В последние годы созданы и создаются крупные испытательные и исследовательские информационные комплексы для самолетов, судов, для проведения исследований в космосе, океане, под землей и т. д.

Крупные автоматизированные информационные комплексы отличаются не только большим объемом информации, но и качественными ее показателями: большим разнообразием и дифференцированием информации по ступеням (рангам) управления, срочности передачи, ценности и требованиям к достоверности, по приоритету, по форме передачи и хранения и т. п.

На каждой ступени управления используются преимущественно определенные виды информации. Оперативная, технологическая информация управления, измерения и сигнализации (типа «да — нет» и измерение параметра) используется, главным образом, на нижних ступенях, на которых происходит более частое непосредственное, так называемое оперативное вмешательство в работу машин и установок.

На верхних ступенях используется информация, предварительно подготовленная в результате интегрирования, статистической и другой обработки, с целью контроля и управления по обобщенным критериям. Здесь уже требуется передавать производственно-статистическую информацию учета продукции, расхода сырья, энергии, топлива и других

ресурсов, на основе которых оптимизируют режим работы системы или комплекса по комплексным критериям. Вся информация, как правило, передается в унифицированной цифровой форме, имеет адреса и текст.

Понятие «информационная» или «информационно-измерительная» **система не имеет четко очерченных границ** снизу и сверху, которые носят, скорее, количественный, а не качественный характер. Так, различие между измерительным прибором и информационно-измерительной системой имеет условный, количественный характер.

Принято считать, что информационно-измерительная система отличается от измерительного прибора или большей сложностью измерительных преобразований, или числом различных измерительных преобразований, или многоканальностью контроля и измерения.

По выполняемым функциям в класс информационно-измерительных систем включают системы с автоматизированными информационными процессами для измерения одного или нескольких сложных параметров (например, статистических), многоканальные системы измерения (тензометрические, для измерения температурных и других полей и т. д.), одно- и многоканальные системы телеизмерений, системы многоточечного автоконтроля, системы телеконтроля и системы диагностики.

В связи с тенденцией укрупнения информационных систем создается все больше информационных комплексов, выполняющих несколько из перечисленных выше функций. В подавляющем большинстве всех АИС на нижних рангах иерархии преобладают информационно-измерительные функции. Так, в энергосистемах через каналы связи передается 92 % информации телеизмерения и телесигнализации и менее 8 % информации телеуправления.

На более высоких рангах иерархии вся информация представляется в унифицированной цифровой форме (передача данных) и различие между измерительной и другой информацией по форме ее представления отсутствует.

Создается взаимосвязанная сеть автоматизированных информационных систем и единая сеть ГСВЦ, разделяющаяся по отраслевому, республиканскому и территориальному признакам.

Единая сеть ГСВЦ будет осуществлять сбор, обработку и хранение информации и по запросу ее выдавать. Уже в настоящее время основные результаты экспериментальных научных исследований в космосе, океане, под землей (методами каротажа), при испытаниях самолетов и других объектов получают с помощью информационно-измерительных систем, обрабатываются и хранятся ЭВМ.

В дальнейшем основные результаты экспериментальных исследований во всех областях науки, в промышленности, транспорте и в сельском хозяйстве будут добываться с помощью информационно-измери-

тельных систем и систем телемеханики. Сбор, обработка, хранение и автоматическая выдача такой информации будут осуществляться ЭВМ.

Необходимо учитывать, что стоимость сбора, обработки, хранения и автоматического поиска информации на единицу количества информации удешевляется с укрупнением вычислительного центра и для крупных ВЦ стоимость этих процессов дешевле по сравнению с неавтоматизированными процессами. Кроме того, уже в настоящее время стоимость автоматической передачи информации (передачи данных) по современным широкополосным каналам связи из расчета на единицу количества информации и тысячу километров дешевле и надежнее, чем передача информации по почте. Одновременно с переходом на ЭВМ на несколько десятичных порядков возрастает и производительность информационных процессов.

При создании взаимосвязанной сети информационных систем на каждом уровне возникают специфические проблемы. Если при выборе технической элементной базы возникают, главным образом, проблемы схемотехники, связанные с переходом на интегральные микросхемы с широким применением микроэлектронной техники, то при создании различных АИС (в том числе систем телемеханики) и взаимосвязанной сети АИС, АСУ и ГСВЦ возникают проблемы системотехники в основном кибернетического характера. К ним относятся проблемы оптимизации структуры, структурной надежности, алгоритмов функционирования, оптимальных принципов организации, адаптации, обучения, самоорганизации и другие проблемы, связанные с выбором рациональных принципов построения систем и комплексов систем.

К таким проблемам относятся, например, оптимизация иерархии управления, структуры сетей связи, пунктов управления и контролируемых пунктов, унификация и оптимизация информационных и машинных языков во всей взаимосвязанной сети АИС и др.

В настоящее время еще значительная часть информационных процессов в народном хозяйстве не автоматизирована и большой удельный вес информации, получаемой с информационно-измерительных систем, записывается в аналоговой форме, не приспособленной для ввода, обработки и хранения на ЭВМ. Это относится к тензометрической, каротажной, медицинской, метеорологической, производственной и некоторым другим видам информации, которые не выдерживают требуемого срока хранения, что приводит к крупным экономическим потерям.

8.3. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМ

Технические средства систем и их элементную базу нельзя рассматривать как нечто установившееся, незыблимое. Они быстро развиваются и изменяются одновременно с совершенствованием систем

Элементная база уже претерпела несколько радикальных изменений и продолжает совершенствоваться. Если первое поколение систем и ЭВМ создавалось на базе вакуумных электронных ламп и релейно-контактных элементов с отмеченными выше недостатками, то второе поколение возникло на основе полупроводниковой электроники.

Информационные системы, созданные на базе полупроводниковой техники, имеют более высокие надежность и долговечность, а сама аппаратура выполняет более сложные функции и во много раз меньше по габаритам. Резко возросли быстродействие и реализуемый объем выполняемых функций. Были разработаны и серийно выпускались типовые логические и функциональные элементы и узлы с полупроводниковыми диодами и транзисторами, на основе которых выпускались и в настоящее время еще эксплуатируются в народном хозяйстве АИС и ЭВМ.

Третье поколение элементной базы явилось дальнейшим развитием элементной базы второго поколения. Слабым местом элементной базы второго поколения были электрические соединения между сопротивлениями, диодами, транзисторами и конденсаторами в каждом элементе или узле. Они требовали специальных проводников, паек и контактных соединений, что понижало надежность аппаратуры, увеличивало габариты и уменьшало быстродействие. При этом требовалось большое количество ручного труда для производства и эксплуатации аппаратуры.

С дальнейшим развитием элементной базы произошел переход на интегральные микросхемы, которые могут выполнять функции устройства, состоящего из нескольких транзисторов, диодов, сопротивлений. В такой интегральной микросхеме соединения между ее элементами заключены в объеме полупроводника и не подвергаются вредным внешним воздействиям окружающей среды. Изготовление интегральной микросхемы на одном кристалле производится автоматически без прикосновения рук человека, что исключает вредные случайные воздействия и сокращает ручной труд. В результате резко возрастают надежность и быстродействие аппаратуры и уменьшаются габариты.

Унифицированные ЭВМ серии «ряд», выпускаемые отечественной промышленностью, на базе элементов третьего поколения выполняют в единицу времени примерно на десятичный порядок больше операций, чем аналогичные ЭВМ второго поколения. Уменьшение габаритов при переходе от одного поколения к другому можно иллюстрировать на примере кварцевых часов, которые относятся к простейшей системе. Кварцевые часы имеют погрешность временного хода около нескольких секунд в месяц. Они состоят из трех частей: стабильного кварцевого электронного генератора (источника информации), работающего на частоте порядка десятков килогерц, электронного делителя частоты, делящего частоту до частот, соответствующих секунде, минуте, часу,

и цифрового или стрелочного индикатора времени. Кварцевые часы на вакуумных электронных лампах имели габариты телевизора, а на транзисторах (второе поколение) — габариты телефонного аппарата.

В настоящее время в СССР и за рубежом выпускаются кварцевые часы на элементах четвертого поколения. Они размещаются в корпусе наручных часов, потребляют всего 15 мкА от одного миниатюрного электроэлемента, работающего без замены 12 месяцев.

В настоящее время продолжается развитие элементной базы в направлении дальнейшей интеграции микросхем, т. е. размещения на одном кристалле большего числа элементов. Это повышает надежность, быстродействие, уменьшает габариты и позволяет создавать более крупные системы, выполняющие более сложные функции.

Дальнейшим этапом развития интеграции явилось создание микропроцессоров и других электронных приборов, при этом на одном или нескольких кристаллах создается микро-ЭВМ. Типовой ряд микропроцессоров с различным быстродействием, различным числом разрядов, входов, выходов и т. д. выпускается серийно на заводах.

Широкое развитие микропроцессоров вносит революционные изменения в информационные системы и информационную технику. До разработки микропроцессоров для создания по техническим требованиям конкретной информационной системы или определенной ее части каждый раз разрабатывались индивидуальные технические устройства, при которых из-за различия технических требований использовались индивидуальные схемы, реализующие логические функции, заданное, отличное каждый раз индивидуальное число входов и выходов для работы с различными входными и выходными устройствами и объектами.

Для народного хозяйства требовались десятки и сотни тысяч таких отличных друг от друга систем или крупных частей информационных систем. Естественно, что серийность выпуска каждой части системы с индивидуальными техническими требованиями была сравнительно небольшой. Путь унификации и типизации отдельных блоков и узлов также не дает радикального решения из-за многообразия технических требований.

Радикальное решение проблемы реализуется с выпуском типового ряда микропроцессоров. При этом индивидуальная по техническому требованию логика для каждой конкретной системы осуществляется путем выбора соответствующего алгоритма, который задается в памяти микропроцессора. В результате микропроцессор может использоваться как автоматический регулятор с различными законами регулирования, управляющая система в стиральной машине, управляющее устройство в системе автоконтроля, измерений, телемеханики и т. д.

При таком подходе резко возрастает серийность выпуска типовых наборов микропроцессоров и сокращаются время и количество труда, необходимые на разработку и наладку информационных систем, и, как

следствие этого, могут создаваться более совершенные информационные системы, выполняющие более сложные функции

Необходимо отметить, что широкое внедрение микропроцессоров не связано с прекращением выпуска и применения элементной базы более ранних поколений. В народном хозяйстве всегда будет существовать широкое многообразие задач, которые невозможно или нерационально решать путем применения одних микропроцессоров Во многих случаях для решения простых задач не требуются микропроцессоры и более эффективно эти задачи могут быть решены с применением интегральных микросхем меньшей интеграции. Потребность в транзисторах, диодах, конденсаторах и сопротивлениях всегда сохранится, так как микросхемы из-за низкого их рабочего напряжения недопустимо подключать непосредственно к линии связи и многим другим устройствам Кроме того, они имеют малую выходную мощность. Многие более эффективные решения реализуются путем применения транзисторных устройств Аналогично применение интегральных микросхем не привело к уменьшению выпуска электронных ламп, транзисторов и диодов

8.4. ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ

Важнейшие критерии оценки и *характеристики* информационных систем в общепризнанном смысле еще не выбраны. Многие авторы относят к важнейшим различные характеристики систем. Наиболее интересный подход к таким характеристикам имеет место в [54], который в основном используется в данной книге.

Рассматривая информационные системы с единых позиций, отнесем к важнейшим следующие интегральные характеристики:

1) эффективность применения системы;
2) полнота (глубина) выполняемых информационных функций;
3) достоверность;
4) надежность;
5) быстродействие;
6) входов и выходов системы;
7) технических средств, реализующих систему, включая источники питания и условия эксплуатации.

Рассмотрим эти характеристики.

Эффективность применения системы. Под этим термином понимается улучшение работы объекта контроля или управления при использовании информационной системы. Ограничимся рассмотрением экономической эффек-

тивности, представляющей наибольший интерес для систем в народном хозяйстве.

Приращение экономической эффективности

$$Э = Э_2 - Э_1, \qquad (8.1)$$

где $Э_1$ — экономический эффект от контролируемого объекта в заданный промежуток времени без информационной системы; $Э_2$ — экономический эффект от того же объекта в тот же промежуток времени с применением информационной системы.

Экономический эффект целесообразно рассчитывать по общепризнанному критерию полных затрат, описанному в § 20.3.

Для сравнения самых различных информационных систем удобнее использовать нормированный показатель эффективности, называемый коэффициентом эффективности:

$$\eta = (Э_2 - Э_1)/(Э_и - Э_1), \qquad (8.2)$$

где $Э_и$ — экономический эффект от объекта при использовании идеальной информационной системы, выполняющей идеально все ее функции и при отсутствии на это затрат. Коэффициент эффективности η изменяется в пределах $0 < \eta < 1$.

Определение и уточнение эффективности системы производятся на нескольких этапах проектирования и эксплуатации системы. На этапе эскизного проектирования производится предварительная оценка по ожидаемым данным.

Полнота (глубина) выполняемых информационных функций показывает, какая часть контролируемого или управляемого объекта охвачена информационной системой. Коэффициент, характеризующий полноту,

$$П_1 = N_с/N, \qquad (8.3)$$

где N — суммарное число параметров (например, контроля, измерения, управления); $N_с$ — число параметров, охваченных информационной системой.

Во многих случаях целесообразно использовать информационный критерий полноты

$$П_и = I_с/I_0, \qquad (8.4)$$

где I_0 — общее количество информации о состоянии объекта по всем параметрам контроля, измерения и управления; $I_с$ — количество информации о состоянии объекта контроля и управления, охваченное системой.

В (8.3) и (8.4) все параметры объектов принимаются равнозначными и равнонадежными, что существенно упрощает задачу за счет несовершенства отображающей модели. Тем не менее для ориентировочной, предварительной оценки такой подход допустим.

Достоверность отражает степень доверия к информации в системе при ее рабочем состоянии.

Достоверность относится к обобщенным характеристикам. Требования, предъявляемые по этому критерию, являются исходными для обоснования частных характеристик системы. К наиболее существенным факторам достоверности относятся точность измерения контролируемых параметров и помехоустойчивость работы всех устройств. С уменьшением достоверности возрастает вероятность неработоспособного состояния объекта контроля, измерения, управления при наличии информации в системе.

Характерным примером малой достоверности является работа с низкой помехоустойчивостью. Аналогичная ситуация возникает при недопустимо низкой точности измерений.

Универсальный критерий для определения достоверности различных информационных систем еще не разработан. Поэтому ограничимся методикой определения достоверности в системах автоконтроля, рассмотренной в § 16.2.

Надежность. Критерии надежности и их числовые характеристики выбираются с учетом особенностей назначения информационной системы и характера решаемых задач.

К основным критериям надежности систем относятся:

среднее время безотказной работы или среднее время наработки на один отказ T_0;

среднее время восстановления отказов $T_в$;

среднее время работы без сбоев $T_{сб}$;

вероятность безотказной работы системы в течение заданного времени t $P(t)$;

вероятность завершения проверки (контроля) объекта или группы объектов в течение заданного времени $T_к$ $P(T_к)$;

коэффициент готовности системы $K_г$.

Для стационарных информационных систем, работающих в народном хозяйстве, широко используются критерии T_0, $T_в$ и частично $K_г$.

Для уменьшения влияния ненадежности на работоспособность системы используются два основных мето-

да самоконтроля в информационной системе: программный и схемный (аппаратурный). Первый основан на использовании заранее отработанных испытательных программ (тестов). Такой самоконтроль в основном позволяет проверить устройства системы, производящие обработку информации.

Схемный самоконтроль требует дополнительного оборудования (аппаратуры) для проверки системы. Одной из разновидностей схемного самоконтроля является применение кодов с обнаружением и исправлением ошибок (см. гл. 3). Методы самоконтроля требуют временной, информационной или аппаратурной избыточности.

Быстродействие характеризуется временем выполнения операций информационной системой (минимальным, средним и другим временем измерения, контроля, управления, диагностики, поиска и т. п.). Для циклических систем быстродействие характеризуется временем цикла $T_ц$. Во многих случаях при определении быстродействия необходимо учитывать среднее время выполнения вспомогательных операций $T_{всп}$, к которым относятся включение источников питания, разогрев аппаратуры, подключение кабелей и т. п. В таких случаях быстродействие, например, системы контроля

$$T_к = T_{всп} + T_{осн} + T_{ап}, \quad (8.5)$$

где $T_{осн}$ — среднее время контроля и поиска неисправностей; $T_{ап}$ — среднее время считывания или записи и анализа результатов контроля.

Быстродействием систем телеизмерения или телесигнализации называется промежуток времени, на который задерживается информация от момента появления события (сообщения) на КП до отображения информации на ПУ или до момента ввода информации в ЭВМ.

Быстродействием системы телеуправления называется промежуток времени, на который задерживается команда ТУ от момента ее передачи на ПУ до момента передачи команды исполнения на исполнительные органы КП.

В быстродействие системы ТУ включается время передачи подготовительных команд и операций (см. гл. 14).

Характеристики входов и выходов системы включают в себя перечень и данные входов и выходов системы, а также характеристики устройств отображения информации. К последним относятся данные диспет-

черского щита и пульта, дисплеев и других средств отображения информации.

Характеристики технических средств включают в себя данные элементной базы (типы и серии микросхем и других элементов), типы готовых блоков, устройств и вспомогательного оборудования, включая источники питания. Дается характеристика условий эксплуатации системы.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

9.1. РАСПРЕДЕЛИТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОММУТАТОРЫ

Распределителем импульсов называется функциональный узел, автоматически распределяющий поочередно или по заявкам импульсы на N своих выходов, при этом

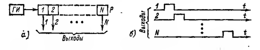


Рис. 9.1. Структурная схема (*а*) и временные диаграммы (*б*) распределителя на *N* выходов.

ГИ — генератор импульсов.

в любой момент времени на всех выходах может быть не больше одного импульса. Следовательно, каждому из выходов распределителя выделяется свой неперекрывающийся временной интервал, в течение которого выдается выходной импульс (рис. 9.1).

Распределитель импульсов *Р* предназначается для переключения цепей временного разделения сигналов и каналов. С этой целью распределитель *Р* может работать совместно с генератором импульсов *ГИ* и логическими элементами $И_1$—$И_N$, включенными на его *N* выходах (рис. 9.2), и будет являться коммутатором (автоматическим переключателем). Понятия «распределитель импульсов» и «коммутатор» близки и в ряде случаев тождественны.

Следует отметить, что автоматические переключатели

в телемеханике принято называть распределителями, а в измерительной технике и связи — коммутаторами.

Распределители импульсов разделяются на две группы.

1. Тактовые распределители (рис. 9.1), осуществляющие процесс распределения импульсов на свои выходы только при поступлении на вход распределителя очередного импульса от генератора импульсов *ГИ*. В однотактных распределителях каждый тактовый импульс вызывает продвижение распределителя на одну ячейку, т. е. распределение импульсов осуществляется с тактовой частотой. В двухтактных распределителях переключение выходных импульсов осуществляется с удвоенной тактовой частотой. Электронные тактовые распределители и коммутаторы могут работать в циклическом и стартстопном режимах или по заявкам.

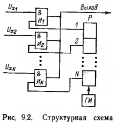


Рис. 9.2. Структурная схема коммутатора, состоящего из тактового распределителя и логических элементов

2. Самоходные распределители (автопереключатели) осуществляют автоматическое распределение импульсов при подаче на их вход одного пускового (стартового) импульса, называемого также синхроимпульсом СИ (рис. 9.3). Скорость распределения импульсов по N выходам определяется только внутренними свойствами самоходного распределителя. После распределения всех N импульсов самоходный распределитель приходит в исходное ждущее состояние до прихода очередного пускового импульса *СИ*.

Рис. 9.3. Структурная схема (*а*) и временные диаграммы (*б*) самоходного распределителя при подаче на его вход синхроимпульса.

К тактовым относятся распределители на запоминающих элементах [магнитных с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), на феррит-диодных, феррит-транзисторных], на диодных матрицах и интегральных микросхемах. К самоходным относятся распределители на линиях задержки и на схемах (дискретных цепях) задержки импульсов.

В зависимости от способа переключения выходных цепей распределители разделяются на бесконтактные и контактные. Последние представляют собой контактные переключатели на N выходов, выполненные на электромагнитных реле или шаговых искателях.

Распределители могут быть выполнены конструктивно в виде единого узла или аппарата (электронно-лучевые, шаговые искатели и интегральные микросхемы) или в виде электрической схемы, состоящей из отдельных компонентов [электромагнитных реле, триггеров, магнитных элементов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) и т. д.].

Основными количественными показателями распределителя являются число его выходов N и диапазон частот переключения (для тактовых распределителей).

При равномерном переключении всех одинаковых N выходов суммарное время переключения, называемое временем цикла,

$$T_ц = NT_T = N/F_T, \tag{9.1}$$

где $F_T = 1/T_T$ — тактовая частота, задаваемая тактовым генератором при равномерном переключении (движении) тактового распределителя.

В самоходных распределителях, как отмечалось ранее, скорость переключения постоянная и определяется внутренними их свойствами, такими, как скорость распространения колебаний в линиях или дискретных цепях задержки.

Тактовые распределители могут переключаться неравномерно, если периоды посылки тактовых импульсов не постоянны. Распределители могут иметь число каналов N от нескольких единиц до нескольких тысяч, например в системах автоконтроля. Диапазон частот тактов распределителей составляет от нескольких герц в релейно-контактных распределителях до миллионов герц в электронных распределителях.

Рассмотрим сначала тактовые распределители на элементах с прямоугольной петлей гистерезиса. В бесконтактном распределителе на магнитных элементах каждый элемент с ППГ представляет собой импульсный трансформа-

тор с кривой намагничивания ферромагнитного сердечника, близкой к прямоугольной (рис. 9.4).

На рис. 9.5 дано схематическое изображение четырехобмоточного элемента с магнитным сердечником с ППГ. Элемент по-разному реагирует на импульсы различной полярности. Если через его обмотки не протекает ток, сердечник может быть только в одном из двух состояний: с положительной или отрицательной остаточной индукцией. Этим состояниям соответствуют точки *0* или *1* на рис. 9.4.

Рис. 9.4. Петля гистерезиса элемента с ППГ.

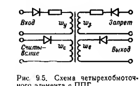


Рис. 9.5. Схема четырехобмоточного элемента с ППГ.

Импульс тока в одной из обмоток с полярностью, при которой созданная им МДС противоположна по знаку остаточной индукции, вызывает перемагничивание сердечника. Происходит резкое изменение магнитной индукции на величину ΔB_1 (рис. 9.4), и во всех обмотках наводятся ЭДС. В замкнутых вторичных обмотках во время перемагничивания протекает ток, значение которого определяется в основном параметрами сердечника, числом витков и электрическим сопротивлением цепи. Если МДС, создаваемая импульсом тока, совпадает по знаку с остаточной индукцией сердечника, то возникает лишь незначительное изменение индукции ΔB_2 (рис. 9.4).

При состоянии сердечника, соответствующем точке *1*, принято считать, что в элемент записана единица, а при состоянии *0* — нуль.

В распределителях импульсов элементы с ППГ могут иметь следующие обмотки (рис. 9.5):

w_c — обмотка считывания или питания (движения), через которую протекает ток тактовых импульсов;

w_y — обмотка записи или управления (вход), предназначенная для подготовки элемента к срабатыванию путем создания МДС, противоположной по знаку МДС обмотки питания;

$w_в$ — выходная обмотка, включаемая в цепь нагрузки элемента;

$w_з$ — обмотка, предназначенная в некоторых схемах для запрета путем создания МДС, противоположной по знаку МДС обмотки управления.

На рис. 9.6 приведена принципиальная электрическая схема однотактного распределителя с элементами с ППГ, используемого в устройстве ТУ — ТС с временны́м разделением сигналов типа ТМЭ (см. § 15.3). Элементы ППГ включены последовательно через диодно-емкостные цепи

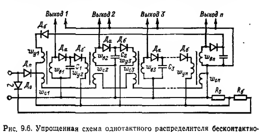


Рис. 9.6. Упрощенная схема однотактного распределителя бесконтактного устройства ТМЭ.

связи $Д_а$, $Д_б$ и C и образуют вместе с ними отдельные ячейки. Каждый сердечник из ленточного пермаллоя имеет три обмотки: обмотку считывания $w_с$, обмотку записи или управления $w_у$ и выходную обмотку $w_в$.

При прохождении через обмотку $w_с$ электрического тока от генератора импульсов (ГИ) ячейка может перейти из одного состояния в другое (перемагнититься). В момент перемагничивания на всех обмотках наводится напряжение, которое используется для заряда конденсатора, а в дальнейшем для перемагничивания последующей ячейки.

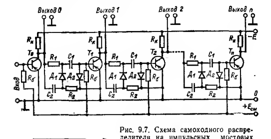
Питающие тактовые импульсы тока с частотой силовой сети (50 Гц) протекают одновременно через обмотки $w_с$ всех ячеек распределителя. Эти импульсы имеют только одну полярность, так как подаются через диод $Д_п$, и могут записать в любую ячейку только нуль. Если в данной ячейке ранее был записан нуль, то после тактового импульса он сохраняется.

Работа распределителя сводится к следующему. Допустим, что в первую ячейку была записана единица за счет прохождения тока через обмотку w_{y1}. Во всех других ячейках записан нуль. Тогда на ближайшем такте первый сердечник перемагнитится импульсом считывания через обмотку w_{c1} и на его выходной обмотке $w_{в1}$ возникнет напряжение, которое зарядит конденсатор C_1 через диод $Д_а$, при этом в сердечник первой ячейки записывается нуль, т. е. он приходит в исходное состояние. Во время импульса считывания напряжение с конденсатора C_1 не подается на вход последующей ячейки w_{y2}, так как диод $Д_б$ заперт питающим импульсом обратной полярности, подаваемым через диод $Д_о$ и сопротивление $R_б$.

После окончания импульса считывания диоды $Д_б$ отпираются и напряжение с конденсатора C_1 подается на обмотку w_{y2}. Возникающий в обмотке w_{y2} разрядный ток конденсатора C_1 перемагничивает второй сердечник, при этом во вторую ячейку записывается единица. Следовательно, за один такт единица передвигается вправо на одну ячейку. С последующими тактовыми импульсами процесс движения единицы по распределителю продолжается, и с каждым тактом она передвигается вправо на одну ячейку. Импульс на выходе каждой ячейки возникает только на том такте, на котором в ней записана единица. Таким образом, на выходе ячеек распределителя импульсы возникают поочередно, синхронно с тактовыми импульсами.

На рис. 9.7 дан пример схемы самоходного распределителя на импульсных мостовых элементах с N ячейками [37]. Плечи моста в каждой ячейке состоят из сопротивлений R_1, R_2 и конденсаторов C_1 и C_2. В диагональ моста включен диод $Д_1$. Промежуток база — эмиттер последующего транзистора служит нагрузкой моста. В ждущем режиме все транзисторы распределителя закрыты, а конденсаторы заряжены примерно до напряжения $E/2$ ($R_к \ll R_1 = R_2$). Входной импульс отрицательной полярности (рис. 9.8, *а*) открывает входной транзистор и вызывает разряд последовательно включенных конденсаторов первого моста, ранее заряженных каждый примерно до $E/2$. Разряд происходит через последовательную цепь из открытых диодов и сопротивление коллектор — эмиттер транзистора T_1 с малой постоянной времени τ_0 (рис. 9.8, *в*). После окончания входного импульса транзистор закрывается и конденсаторы $C_1 = C_2$ первого моста заряжаются с постоянной времени $\tau \approx R_1C_1 = R_2C_2$, при этом ток заряда конденсато-

ра C_1 открывает и поддерживает открытым транзистор T_1 на выходе первого моста. Диод $Д_1$ первого моста закрыт. За это время конденсаторы C_1 и C_2 второго моста разряжаются на сопротивление эмиттер — коллектор транзистора T_1 с постоянной времени τ_0.



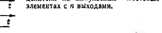


Рис. 9.7. Схема самоходного распределителя на импульсных мостовых элементах с n выходами.

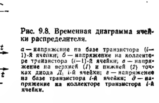


Рис. 9.8. Временная диаграмма ячейки распределителя.

а — напряжение на базе транзистора (i—1)-й ячейки; *б* — напряжение на коллекторе транзистора (i—1)-й ячейки; *в* — напряжение на верхней (*1*) и нижней (*2*) точках диода $Д_1$ i-й ячейки; *г* — напряжение на базе транзистора i-й ячейки; *д* — напряжение на коллекторе транзистора i-й ячейки.

В момент времени, когда напряжение на конденсаторе C_1 первого моста достигает напряжения на сопротивлении R_2 (во время заряда конденсаторов), диод $Д_1$ первого моста открывается, заряд конденсаторов C_1 и C_2 прекращается и транзистор T_1 закрывается. Процессы в последующих ячейках аналогичны.

Таблица 9.1

Интервал времени	Состояния транзисторов				
	0-го	1-го	2-го	...	n-го
$T_{вх}$	О	З	З	...	З
T_1	З	О	З	...	З
T_2	З	З	О	...	З
...	...	...	...	...	...
T_n	З	З	З	...	О

Время задержки, создаваемое ячейкой распределителя,

$$T_i \approx R_{1i} C_{1i} \ln 2. \qquad (9.2)$$

В табл. 9.1 приведены состояния транзисторов в дискретные промежутки времени $T_{вх}$, T_1, T_2, ..., T_n. Открытое и закрытое состояния транзисторов обозначены буквами *О* и *З*. Транзисторы открываются один за другим, так что в каждый момент времени открыт только один из них и каждая ячейка распределителя вносит определенную задержку. На выходы ячеек распределителя импульсы поступают также последовательно одни за другим. При соответствующем выборе параметров скорость движения в распределителе с мостовыми элементами, а следовательно, и времена задержек T_1, T_2, ..., T_n в первом приближении не зависят от напряжения питания и от параметров транзисторов

Значения задержек T_1, T_2, ..., T_n могут быть выбраны одинаковыми или различными. Следовательно, возможна замена нескольких ячеек с соседними временными позициями одной ячейкой, имеющей соответственно большее время задержки. Это позволяет, например, упростить распределитель, если в нем используются не все одинаковые временные позиции. Для запуска и работы самоходного распределителя необходим только стартовый, запускающий импульс *СИ* (см. рис. 9.3). Самоходные распределители применяются при числе $N < 10 \div 15$ и постоянной скорости движения распределителя из-за трудностей осуществления высокостабильных элементов задержки и возможного искажения импульсов.

Широко применяемые тактовые матричные распределители описаны в § 7.5. Среди интегральных микросхем есть микросхемы для матриц и двоичных счетчиков, из которых собираются матричные распределители,

отличающиеся высокой надежностью и экономичностью. В государственной системе приборов (ГСП) и ее ветвях (см. гл. 18) предусмотрены специальные распределители

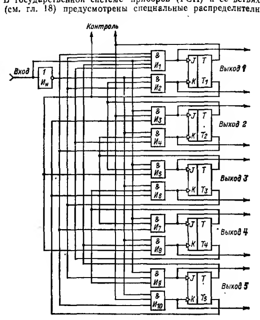


Рис. 9.9. Функциональная схема распределителя системы АССТ.

и коммутаторы как функциональные узлы для построения информационных систем и различных устройств.

Рассмотрим в виде примера такой распределитель импульсов ветви АССТ (агрегатной системы средств телемеханики) на микросхемах [45].

Распределитель работает циклически и формирует разделенные во времени импульсы для передачи, приема и обработки информации. Цикл распределителя состоит из 22 тактов ($N=22$), в каждом из которых формируются два одинаковых, но сдвинутых во времени импульса на выходе ячеек (рис. 9.9). В распределителе есть возможность контроля работоспособности элементов и межэлементных связей при небольших дополнительных аппаратурных затратах.

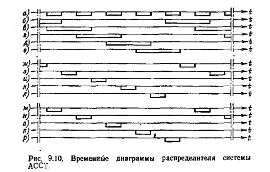


Рис. 9.10. Временные диаграммы распределителя системы АССТ.

Для наглядности на функциональной схеме распределителя (рис. 9.9) приведены только 5 из 22 ячеек. Каждая ячейка состоит из триггера T и двух логических элементов $И$. Инвертор $И_{и}$ преобразует однофазные входные тактовые импульсы в парафазные. Внешняя схема контроля осуществляет контроль за работой распределителя по изменению выходных импульсов от первого триггера.

Рассмотрим работу распределителя, начиная с исходного состояния, при котором триггер T_1 находится в состоянии 1, а все другие — в состоянии 0. Тогда на все три входа схемы $И_{10}$ подаются сигналы 1, а сигнал с выхода $И_{10}$ фиксирует исходное состояние распределителя.

При подаче на вход распределителя импульса от тактового генератора (рис. 9.10, $а$) сигнал на выходе инвертора переходит в состояние 0, а следовательно, 0 подается на

одни из входов $И_{10}$, что вызывает ее запирание (рис. 9.10, ж), а на все входы схемы $И_3$ подается 1, открывающая ее. Выходной сигнал схемы $И_3$ (рис. 9.10, м) вызывает срабатывание триггера T_2 и перевод его в состояние 1.

После окончания тактового импульса на все входы схемы $И_2$ подается 1 и ее выходной сигнал (рис. 9.10, з) устанавливает триггер T_1 в состояние 0. При приходе следующего тактового импульса (рис. 9.10, н) триггер T_3 переводится выходным импульсом $И_5$ в состояние 1 (рис. 9.10, г), а после окончания тактового импульса выходной сигнал схемы (рис. 9.10, о) возвращает триггер T_2 в состояние 0. Остальные ячейки распределителя работают аналогично.

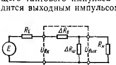


Рис. 9.11. Эквивалентная схема канала коммутатора.

На вход схемы $И_1$ сигналы подаются с выхода всех триггеров, кроме первого, что обеспечивает циркуляцию (движение) по распределителю только одной 1. Это позволяет устанавливать первоначально распределитель, уменьшает влияние помех и позволяет блокировать распределитель при неисправностях.

Измерительным коммутатором (измерительным автоматическим переключателем) *называется коммутатор, вносящий достаточно малую погрешность измерений* (во многих случаях меньше 1—2 %).

Измерительные коммутаторы применяются при измерениях и телеизмерениях. Число переключаемых каналов в таких коммутаторах, например, при автоконтроле может достигать многих тысяч. Электронные измерительные коммутаторы (тактовые) могут работать в циклическом или стартстопном режиме.

Рассмотрим погрешности измерительных коммутаторов без учета ЭДС, возникающих в элементах коммутатора, и без взаимного влияния каналов коммутатора. Упрощенная эквивалентная схема одного из каналов коммутатора приведена на рис. 9.11. Здесь R_i — внутреннее сопротивление; $R_н$ — сопротивление нагрузки коммутатора; ΔR_s — случайное изменение последовательного (переходного) сопротивления в одном канале коммутатора (включенного в данный момент); $\Delta R_ш$ — случайное изменение шунтирующего сопротивления коммутатора в одном канале. При этом неизменяющиеся части последовательного и шун-

тирующего сопротивлений коммутатора не рассматриваются, так как вносимые ими погрешности имеют систематический характер и могут быть учтены. На рис. 9.11 пунктиром обведен рассматриваемый канал коммутатора.

Будем считать, что все каналы коммутатора одинаковы и выполняется условие

$$\Delta R_s \ll R_{\text{п}} \ll \Delta R_{\text{ш}}. \tag{9.3}$$

Это соответствует условиям, при которых относительная погрешность канала коммутатора

$$\delta = (u_{\text{вх}} - u_{\text{вых}})/u_{\text{вх}} \ll 1. \tag{9.4}$$

Погрешность коммутатора имеет две составляющие:

$$\delta = \delta_s + \delta_{\text{ш}}, \tag{9.5}$$

где δ_s — погрешность, обусловленная изменением последовательного сопротивления ΔR_s. При выполнении условия (9.3)

$$\delta_s = \Delta R_s/(R_i + R_{\text{н}}). \tag{9.6}$$

Погрешность, обусловленная изменением шунтирующего сопротивления коммутатора,

$$\delta_{\text{ш}} = R_{\text{н}}/\Delta R_{\text{ш}}(1 + R_{\text{н}}/R_i). \tag{9.7}$$

Например, для $R_{\text{н}}/\Delta R_{\text{ш}} = 10^{-3}$ и $R_{\text{п}}/R_i = 1$ $\delta_{\text{ш}} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$.

Суммарная погрешность, вносимая коммутатором, во многих случаях будет минимальной при

$$\delta_s = \delta_{\text{ш}}. \tag{9.8}$$

Подставив в (9.8) величины δ_s из (9.6) и $\delta_{\text{ш}}$ из (9.7), получим:

$$R_{\text{н}} R_i = \Delta R_s \Delta R_{\text{ш}}. \tag{9.9}$$

Из (9.9) определим оптимальное сопротивление нагрузки, при котором суммарная погрешность коммутатора минимальная (δ_{min}):

$$R_{\text{н опт}} = \sqrt{K \Delta R_s \Delta R_{\text{ш}}}, \tag{9.10}$$

где $K = R_{\text{п}}/R_i$.

Так, при $K=4$, $\Delta R_s = 0{,}1$ Ом, $\Delta R_{\text{ш}} = 10^9$ Ом $R_{\text{н опт}} = 20\,000$ Ом.

В табл. 9.2 приведены ориентировочные, достижимые сравнительно простыми средствами значения ΔR_s, $\Delta R_{\text{ш}}$, $R_{\text{н опт}}$ и δ при $R_{\text{н}}/R_i = 3$ для контактных и бесконтактных измерительных коммутаторов. Сравнительно небольшие

Таблица 9.2

Тип коммутатора	ΔR_s, Ом	$\Delta R_ш$, МОм	$R_{н\,опт}$ при $R_н/R_c = 3$ кОм	δ
Контактный	0,01—0,1	10^4—10^5	30—300	10^{-6}—10^{-5}
Бесконтактный	1—10	10^3—10^4	10—100	10^{-4}—10^{-3}

значения ΔR_s имеют контактные коммутаторы с герконами (магнитоуправляемыми контактами) с золочеными контактами или контактами, смоченными ртутью. Для бескон-

Рис. 9.12. Упрощенная схема измерительного ключа на транзисторах (с компенсацией).

Рис. 9.13. Упрощенная схема измерительного ключа на полевых транзисторах.

тактных коммутаторов наибольшие значения $\Delta R_ш$ имеют бесконтактные коммутаторы на полевых транзисторах и интегральных микросхемах с МОП-структурой.

Как следует из табл. 9.2, лучшие по точности результаты можно получить с контактными измерительными коммутаторами. Однако такие коммутаторы имеют низкое быстродействие, меньшее число коммутируемых цепей и не работают по сложной программе. Бесконтактные измерительные коммутаторы на интегральных микросхемах с ключами, выполненными на одном кристалле, имеют лучшие показатели.

На рис. 9.12 и 9.13 приведены схемы электронных ключей на обычных транзисторах и полевых — с компенсацией ЭДС и влияния управляющих напряжений U_y на работу коммутатора. Такой измерительный коммутатор состоит из бесконтактного коммутатора или распределителя, рассматриваемых в данном параграфе, с которого канальные напряжения, например, подаются через логические элементы $И_1$—$И_N$ (см. рис. 9.2).

Характеристики ключей могут быть улучшены, если транзисторные схемы заменить интегральными микросхемами. Лучшие бесконтактные коммутаторы имеют собственные шумы, остаточные шумы и остаточные ЭДС около 10—100 мкВ. Уровень шумов и остаточных ЭДС в контактных измерительных коммутаторах на 1—2 десятичных порядка меньше, однако другие показатели, такие, как быстродействие и надежность, значительно хуже. Так, быстродействие коммутаторов с герконами определяется временем срабатывания и отпускания реле. Минимальное время срабатывания реле с герконами составляет 1,5—2,5 мс и зависит главным образом от дребезга контактов при их замыкании. Время отпускания реле составляет 0,5—1 мс. Число срабатываний геркона, определяющее его надежность, составляет 10^6—10^9, а в отдельные случаях и более. Измерительные коммутаторы на герконах выпускаются промышленностью.

Рассмотренный подход к измерительным коммутаторам представляет интерес при переключении первичных преобразователей с электрическим выходом или при переключении электрических выходных цепей в приемном устройстве, т. е. при коммутации аналоговых или многопозиционных сигналов.

При коммутации двухпозиционных кодовых сигналов (0, 1) требования к измерительным коммутаторам резко упрощаются. Уровень выходного и входного сигналов коммутатора при этом может изменяться в широких пределах, что является одним из существенных положительных свойств кодовых систем с двухпозиционными сигналами.

Влияние изменяющейся составляющей сопротивления шунта в каждом канале коммутатора $\Delta R_{ш}$ на погрешность, вносимую коммутатором, возрастает с увеличением числа каналов N, так как логические элементы И или другие элементы (см. рис. 9.2) включены параллельно и каждый из них имеет сопротивление утечки.

Для уменьшения взаимного влияния каналов и влияния $\Delta R_{ш}$ на погрешность коммутатора применяют двух- и многоступенчатые групповые измерительные коммутаторы (рис. 9.14), при этом, например, первичные преобразователи *ПП* разбиваются на S групп, для каждой из которых включается свой коммутатор $Км_1$—$Км_s$.

При двухступенчатой коммутации на S таких коммутаторов включается один групповой коммутатор $Км_{гр}$. Коммутаторы, непосредственно переключающие цепи первичных

преобразователей, могут быть контактными, низкоскоростными. На их выходах при этом включаются аналого-цифровые преобразователи АЦП$_1$—АЦП$_s$, а групповой коммутатор $Км_{гр}$ выполняется электронным, быстродействующим и переключает двухпозиционные кодовые сигналы. Групповой коммутатор $Км_{гр}$ сначала опрашивает первый коммутатор, затем второй, третий и т. д. за время одного такта контактного коммутатора. Такие многоступенчатые коммутаторы применяются в промышленных системах.

Рис 9.14 Структурная схема двухступенчатого измерительного коммутатора

Как отмечалось ранее, минимальную погрешность из-за остаточной ЭДС можно получить с компенсационными узлами на интегральных микросхемах, выполненных на одном кристалле, благодаря высокой однородности кристалла. В заключение параграфа приведем классификацию распределителей и коммутаторов, а также дадим их ориентировочную оценку.

Классификация распределителей и коммутаторов приведена на рис. 9.15. Схема линейного (кольцевого) бесконтактного коммутатора приведена на рис. 9.1. Линейный коммутатор может быть выполнен на бесконтактных или релейно-контактных элементах и при необходимости замыкается в кольцо (становится кольцевым). Распределитель или кольцевой счетчик, описанный в гл. 10, поочередно выдает импульсы на логические элементы И и поочередно подключает с помощью этих элементов входные цепи к общему выходу (см. рис. 9.2). Описанные выше распределители импульсов на магнитных элементах также могут работать с логическими элементами и относятся к линейным (кольцевым).

Схема пирамидального коммутатора на релейно-контактных элементах в виде электромагнитных реле P_1, P_2 и P_3 для $N=8$ приведена на рис. 9.16. Реле P_1, P_2 и P_3 включаются на выходе двоичного счетчика так же, как и в матричном коммутаторе, описанном в гл. 7. Реле P_1 подключается к первому разряду счетчика (2^0), реле P_2 — ко второму

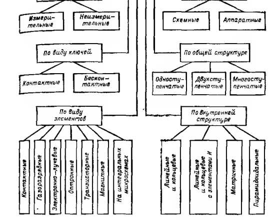


Рис. 9.15. Классификация тактовых распределителей и коммутаторов.

Рис. 9.16. Схема пирамидоидального коммутатора на электромагнитных реле.

(2^1) и реле P_3 — к третьему (2^2). Временная диаграмма их работы приведена в гл. 7 и соответствует таблице двоичного натурального кода. Двоичный счетчик может быть образован с использованием дополнительных контактов тех же реле.

Переходя к ориентировочной оценке распределителей и коммутаторов, отметим, что минимальное последовательное сопротивление ΔR_s (см. рис. 9.11) при включенном канале коммутатора может быть получено с линейными (кольцевыми) и матричными коммутаторами. Однако для таких коммутаторов имеет место наибольшее влияние шунтового сопротивления $\Delta R_{ш}$ (9.7), так как элементы включены параллельно. Наибольшее влияние последовательное сопротивление ΔR_s оказывает в пирамидальных коммутаторах, у которых включается наибольшее число последовательных цепей, при этом в пирамидоидальных коммутаторах влияние $\Delta R_{ш}$ наименьшее.

Промежуточное место занимают двух- и многоступенчатые коммутаторы, с которыми может быть получена минимальная суммарная погрешность путем выбора оптимального числа ступеней и других параметров коммутатора. К недостаткам пирамидоидальных коммутаторов относится большое число контактов и реле низших разрядов, которое возрастает с ростом числа переключаемых каналов N. Поэтому пирамидоидальные коммутаторы применяются при небольшом числе каналов.

По суммарным показателям наибольший интерес представляют коммутаторы на интегральных микросхемах и оптронах. Коммутаторы на оптронах могут иметь наибольшее быстродействие, низкий уровень перекрестных и других помех и могут переключать наибольшее число каналов. Предварительное знакомство с этим новым и быстро развивающимся направлением можно получить в § 4.4.

9.2. КОДИРУЮЩИЕ И ДЕКОДИРУЮЩИЕ УЗЛЫ

Кодирующим узлом называется преобразователь дискретных сообщений или сигналов (например, импульсов) в кодовые комбинации заданного кода, а *декодирующим — обратный преобразователь кодовых комбинаций* заданного кода в дискретные сообщения или сигналы, выдаваемые на индивидуальные выходы. Таким образом, кодирующие и декодирующие узлы выполняют функции кодового разделения сигналов в передающем и приемном устройствах соответственно.

В гл. 3 было показано, что код удобно представить в виде матрицы размером $n \times N$ (3.1) с числом строк, равным числу кодовых комбинаций N. Каждая строка матрицы длиной не более n является кодовой комбинацией (в рав-

номерных кодах $n=\text{const}$). Для рассматриваемых двухпозиционных кодов в матрице записываются нули или единицы (0 и 1). При передаче кодовых комбинаций в виде комбинаций импульсов нули соответствуют отсутствию импульсов (разомкнутые контакты), а единицы — наличию импульсов (замкнутые контакты). Поэтому любая кодовая комбинация строки будет реализовываться соответствующей комбинацией замкнутых контактов и осуществляться путем нажатия одного многоконтактного ключа или пере-

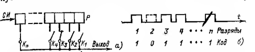


Рис. 9.17. Структурная схема кодирующего устройства с самоходным распределителем для n-разрядного кода (a) и его временная диаграмма для комбинации кода 1011...1 ($б$).

дачи на регистр сдвига комбинаций единиц из памяти или ЭВМ.

Кодирующее устройство называют также кодером или шифратором, а декодирующее — декодером или дешифратором. Кодер формирует, а декодер разделяет кодовые комбинации по индивидуальным выходным цепям.

Простейший кодер, преобразующий n-разрядную комбинацию параллельного кода в n-разрядную комбинацию последовательного кода, состоит из n контактов и распределителя P, выходы ячеек которого соединены с выходом кодера через контакты (рис. 9.17, a). При подаче на вход распределителя запускающего синхроимпульса $СИ$ распределитель последовательно выдает импульсы на контакты K_n, ..., K_1 и передает на выход комбинацию n-разрядного последовательного кода (рис. 9.17, $б$). В кодере используются тактовые или самоходные распределители.

Кодер может быть использован для формирования любого двухпозиционного последовательного кода с алфавитом 0 и 1 длиной n. Для этого выбирается соответствующее число ключей, ячеек распределителя и закон кодообразования. Так, для кода на сочетание C_n^2 при передаче любой кодовой комбинации всегда замкнуты только два из n контактов. Соответственно для распределительного кода C_n^1 всегда замкнут только один контакт. Такой код

широко используется в устройствах ТУ — ТС для передачи команд телеуправления.

Кодер (шифратор), приведенный на рис. 9.17, применяется в циклических системах телемеханики с временным разделением сигналов.

В цифровых системах с кодовым разделением сигналов параллельный код (двухпозиционный) сохраняется в элементах памяти или записывается непосредственно в регистре сдвига. Для преобразования кодовых комбинаций

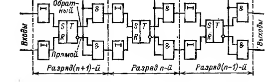


Рис. 9.18. Функциональная схема $(n-1)$-го, n-го и $(n+1)$-го разрядов регистра сдвига на триггерах.

параллельного кода в последовательный регистр с записанными в нем кодовыми комбинациями запускается с тактовой частотой F_T и с его последовательного выхода выдается последовательный код. Работа регистра описана далее.

Декодер имеет более сложное устройство. Рассмотрим декодеры для кодовых комбинаций n-разрядного двухпозиционного незащищенного кода. Такой декодер автоматически вырабатывает выходной сигнал на индивидуальном выходе при приходе из канала связи присвоенной данному выходу кодовой комбинации последовательного кода. Декодер может быть рассчитан на несколько или на все кодовые комбинации, например, цифрового кода $N=2^n$. Он имеет число индивидуальных выходов, равное числу присвоенных ему принимаемых кодовых комбинаций (см. гл. 7).

Универсальным декодером двухпозиционного n-разрядного кода, например, является схема, состоящая из регистра сдвига на триггерах и логических элементов И и «Запрет» (см. гл. 7).

Регистром называется функциональный узел, выполняющий функции приема, хранения и передачи информации в виде двухпозиционного кода, содержащего кодовые комбинации из элементов 0 и 1 (при преобразовании параллельного кода в последовательный и обратно). В зависимости от способов записи информации различают регистры последовательного, параллельного и параллельно-последовательного типов. Ограничимся рассмотрением статических регистров, получивших более широкое применение в устройствах телемеханики. Функциональная схема ($n-1$)-го, n-го и ($n+1$)-го разрядов такого регистра сдвига приведена на рис. 9.18.

В каждом запоминающем триггере Т используются оба входа и выхода. Выходы триггера более младшего разряда соединены с соответствующими входами триггера соседнего более старшего разряда через логические элементы И и формирующие линии задержки.

При каждом импульсе сдвига (на каждом такте) информация из предыдущего триггера передается в триггер последующего разряда, т. е. производится сдвиг символов записанного слова вправо. Импульс сдвига (с шины «сдвиг») проходит через элемент И на вход установки единицы последующего триггера, если в предыдущем триггере записана единица. Если в предыдущем триггере записан нуль, то сигнал сдвига проходит через второй логический элемент И на вход установки нуля. Линии задержки удерживают триггер в исходном состоянии на время передачи информации из одного разряда в другой и устраняют влияние помех при прохождении импульсов сдвига, т. е. имеют вспомогательное значение.

Регистр с n разрядами может быть заполнен n-разрядным словом последовательного кода, подаваемого на вход регистра за n тактов. После этого прием информации прекращается и записанную комбинацию n-разрядного параллельного кода можно считывать параллельно с n разрядов регистра. Таким образом, регистр преобразует последовательный код в параллельный или обратно. Заполнение регистра Рг шестиразрядным словом 101100 показано на рис. 9.19.

Декодер на $N=2^n$ или несколько кодовых комбинаций состоит из n-разрядного регистра сдвига на триггерах Рг и диодной матрицы (ДМ) (см. гл. 7). В отличие от матричного распределителя здесь двоичный счетчик (на триггерах) заменяется регистром сдвига, при этом ДМ для за-

данных кодовых комбинаций, имеющих индивидуальные выходы, выполняет функции как логических элементов И, так и логических элементов ЗАПРЕТ (рис. 9.20 и гл. 7).

Декодер на одну кодовую комбинацию может иметь более простое устройство.

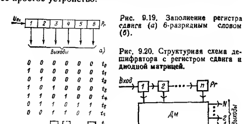


Рис. 9.19. Заполнение регистра сдвига (а) 6-разрядным словом (б).

Рис. 9.20. Структурная схема дешифратора с регистром сдвига и диодной матрицей.

Структурная схема такого декодера (дешифратора), называемого декодером (дешифратором) адреса (одного), приведена на рис. 9.21. На вход дешифратора из линии связи подаются импульсы последовательного кода, из ко-

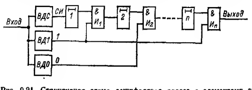


Рис 9.21. Структурная схема дешифратора адреса с элементами задержки.

торых выделяются схемой ВДС синхронизирующие импульсы *СИ*, схемой *ВД1* — единицы (1) и схемой *ВД0* — нули (0). Для проводных линий, например, синхронизирующие импульсы часто передаются в виде импульсов противоположной полярности и разделяются диодами. На выходе схемы *ВД1* выходное напряжение возникает при передаче единиц, а на выходе схемы *ВД0* — при передаче нулей.

Синхроимпульс *СИ* запускает цепочку из *n* элементов задержки, у которых между каждой парой соседних элементов включен логический элемент И. Число элементов задержки *n* равно числу разрядов кода. Если в данном разряде передается 1, то после элемента задержки данного разряда включается элемент И, второй вход которого подключается к *ВД1*, а если в разряде передается 0, то второй вход *И* подключается к *ВД0*.

Временной интервал каждого элемента задержки выбирается равным периоду тактовой частоты $T_T = 1/F_T$. Поэтому синхроимпульс пройдет до конца цепочки из всех элементов задержки, т. е. на выход дешифратора только при приеме кодовой комбинации, присвоенной данному дешифратору адреса. Для всех других кодовых комбинаций с той же тактовой частотой F_T будет защитный отказ в прохождении синхроимпульса в одном из элементов И при отсутствии соответствующей 1 в кодовой комбинации. Соответственно защитный отказ возникает при трансформации 0 в 1 в логическом элементе И, подключенном к *ВД0*. Дешифратору, изображенному на рис. 9.21, присвоен адрес **10...1**.

9.3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КОДОВ

Преобразователем кодов называется функциональный узел, преобразующий один код в другой. Такие функциональные узлы преобразуют, например, двоичный или двоично-десятичный код в десятичный или в код для отображения информации на цифровом индикаторе, незащищенный код в код с обнаружением или исправлением ошибок, а также производят обратное преобразование в приемном устройстве. Широко применяют преобразователи кодов в виде диодных матриц (см. гл. 7).

Для пояснения принципов действия рассмотрим простейшие преобразователи двухпозиционных кодов. На рис. 9.22 приведена схема преобразования параллельного двоичного кода в десятичный, например, с целью отображения или записи информации. Положение переключателей $П_1$, $П_2$ и $П_3$ определяется коэффициентами a_0, a_1 и a_2 в трех разрядах двоичного кода (см. гл. 3). Каждый переключатель находится в верхнем положении, если соответствующий ему коэффициент a_i равен 1, и в нижнем положении, если a_i равен 0. Для этого входная управляющая цепь электронного или электромагнитного реле, переключающего данный

двоичный разряд, подключается к соответствующей ветви схемы с параллельно записанными комбинациями двоичного кода (например, к двоичному счетчику на триггерах или регистру сдвига с записанным на нем параллельным двоичным кодом).

Прямое сопротивление каждого открытого диода (рис. 9.22) в диодной матрице $R_d \ll R$. Поэтому на любой вертикальной шине выходное напряжение $u \ll E$ (E — напряжение питания), если эта шина соединена через какой-либо

Рис. 9.22. Схема преобразователя 3-разрядного двоичного кода в десятичный.

диод с горизонтальной шиной, замкнутой через контакт переключателя $П_1$—$П_3$ на минус батареи питания. При этом ток протекает по следующей цепи: сопротивление R данной вертикальной шины, открытый диод, горизонтальная шина, замкнутый контакт переключателя $П_1$—$П_3$, минус батареи. Отметим, что диоды включены в соответствии с таблицей двоичных чисел (см. рис. 3.1).

В положении переключателей, изображенном на рис. 9.22, ток протекает во всех вертикальных шинах, за исключением шины *0*. Следовательно, только на вертикальной шине *0* напряжение близко к напряжению E (без учета нагрузки), т. е. положение трех переключателей соответствует десятичной цифре 0. Для каждой другой комбинации

Таблица 9.3

Десятичные цифры на индикаторе	Состояние элементов 7-элементного индикатора						
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7
0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0
2	1	1	0	1	1	0	1
3	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	1	0	0	1	1
5	1	0	1	1	0	1	1
6	1	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	0	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	0	1	1

переключателей ток через открытый диод не будет проходить только по одной горизонтальной шине и напряжение на ней будет близко к E (без учета нагрузки).

На рис. 9.23 приведено схематическое изображение типового 7-элементного индикатора десятичных цифр (от 0 до 9), широко применяемого в цифровой технике. Схемы для преобразования десятичного кода в код для 7-элементного индикатора в соответствии с табл. 9.3 и рис. 9.23 приведены на рис. 9.24. Семь элементов индикатора (рис. 9.23) изображены на рис. 9.24 в виде нагрузок Z_i.

Рис. 9.23. Семиэлементная ячейка цифровой индикации

Из табл. 9.3 следует, что если для индикации десятичных цифр зажигать соответствующие элементы индикатора по схеме на 9.24, *а*, то потребуется 49 диодов, а по схеме на 9.24, *б*—21 диод (по числу единиц и нулей в табл. 9.3).

В схеме на рис. 9.24, *б*, если минус с источника питания ($-E$) через переключатель подается на вертикальную шину данной десятичной цифры, соединенные с шиной диоды открыты и падение напряжения на них невелико, т. е. через диоды и соответствующее сопротивление протекает ток. При этом открытые диоды шунтируют элементы индикатора и на всех горизонтальных шинах, с которыми эти диоды соединены, создается малое напряжение относительно минуса батареи, которое недостаточно для свечения элементов индикатора.

Так, если переключатель *П* соединен с вертикальной шиной *8* (при индикации цифры 8), то минус с источника питания через эту шину и диоды не подается ни на одну горизонтальную шину, следовательно, светятся все семь элементов индикатора, изображающих цифру 8.

На рис. 9.25 приведена функциональная схема преобразователя двоичного кода в код Грея, а

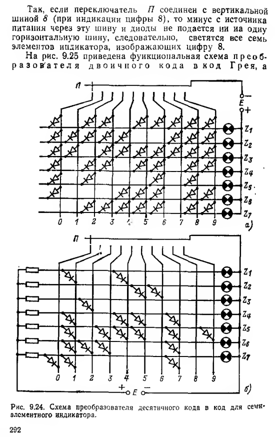


Рис. 9.24. Схема преобразователя десятичного кода в код для семиэлементного индикатора.

на рис. 9.26 — функциональная схема преобразователя кода Грея в двоичный код.

Как было указано в гл. 3, преобразование двоичного кода в код Грея осуществляется путем суммирования по модулю 2 разрядов двоичного кода с разрядами той же кодовой комбинации, сдвинутыми на один разряд в направлении большего разряда. Преобразование, например, 5-разрядной кодовой комбинации двоичного кода в код Грея можно записать в следующем виде:

$$
\begin{array}{lccccc}
\text{Двоичный код:} & a_4 x^4 + & a_3 x^3 + & a_2 x^2 + & a_1 x + & a_0 x^0 \ldots \\
+ & & a_4 x^3 + & a_3 x^2 + & a_2 x + & a_1 x^0 \ldots \\
\hline
\end{array}
$$

$$
\text{Код Грея:} \quad a_4 x^4 + (a_4 \oplus a_3) x^3 + (a_3 \oplus a_2) x^2 + (a_2 \oplus a_1) x + (a_1 \oplus a_0) x_0 \ldots \tag{9.11}
$$

Рис 9.25. Функциональная схема преобразователя двоичного кода в код Грея.

Рис. 9.26. Функциональная схема преобразователя кода Грея в двоичный натуральный код.

Такое преобразование осуществляется с помощью регистра сдвига *Рг* и сумматоров по модулю 2 (рис. 9.25).

После записи двоичного кода в регистр производится параллельное считывание кода, при этом ключи замыкаются и на выходах сумматоров по модулю *2 М2* получается параллельный код Грея.

Преобразование последовательного кода Грея в последовательный двоичный код осуществляется с помощью более простой схемы, состоящей из триггера и логического элемента И (рис. 9.26). Последовательный код Грея подается, начиная со старшего разряда па счетный вход триггера. Каждый импульс вызывает опрокидывание триггера. Состояние триггера зависит от того, четное или нечетное число импульсов поступило на его вход. Логический элемент И пропускает тактовый импульс от генератора тактовых импульсов *ГТИ*, если на инверсном выходе триггера возникает 1, и тогда на выходе схемы И появляется 1 двоичного кода. При очередном тактовом импульсе на выходе схемы появляется 0

в тех случаях, когда на инверсном выходе триггера напряжение равно нулю. Преобразование кодов иллюстрируется путем сопоставления кодового дерева двоичного кода и кода Грея (см. рис. 3.6, 3.8 и табл. 3.1).

Преобразование незащищенного двоичного или любого двухпозиционного кода в защищенный код с четным или нечетным числом единиц в кодовой комбинации осуществляется с помощью схемы на рис. 9.27. Схема декодирова-

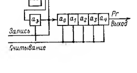


Рис. 9.27. Функциональная схема преобразования незащищенного двухпозиционного 5-разрядного кода в код с защитой на четность (нечетность).

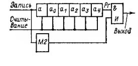


Рис. 9.28. Структурная схема защиты при приеме двухпозиционного кода с защитой на четность (нечетность).

ния (защиты) в приемном устройстве приведена на рис. 9.28.

В начале преобразования, например, пятиразрядной кодовой комбинации последовательного двоичного кода производится ее запись в пять ячеек в регистр *Pг* (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4), начиная со старшего разряда (см. рис. 9.27). Одновременно производится суммирование по модулю 2 в схеме *M2*. В качестве такой схемы может использоваться, например, триггер со счетным входом, прямой или инверсный выход которого соединяется с шестой ячейкой регистра a_3 в зависимости от того, как осуществляется защита: по четности или нечетности импульсов. После записи кодовой комбинации в регистр *Pг* производится ее считывание в параллельном коде с соответствующих шести ячеек регистра или продвижение защищенной кодовой комбинации на выход регистра в последовательном коде.

Защита по четности или нечетности им-

пульсов в приемном устройстве осуществляется, например, для рассмотренной на рис. 9.27 кодовой комбинации с помощью схемы на рис. 9.28. Сначала последовательный код записывается в шесть ячеек регистра *Рг*. Одновременно производится суммирование принимаемых импульсов по модулю 2 схемой *M2*, в качестве которой, так же как и ранее, может использоваться триггер со счетным входом. После окончания записи в регистр сумматор по модулю 2 выдает на выход 1, если число импульсов не искажено, и 0 — при искаженном числе импульсов, т. е. *M2* разрешает или запрещает считывание кодовой комбинации с регистра. В последнем случае логический элемент И запрещает считывание кодовой комбинации с выхода преобразователя.

Как видно из рисунка, регистр *Рг* непосредственно не участвует в схеме защиты и создает только задержку на число тактов, равное суммарному числу разрядов в кодовой комбинации (в данном случае — шесть). Поэтому защита по четности (нечетности) непосредственно осуществляется схемой, состоящей из сумматора по модулю 2 и логического элемента И, а регистр *Рг* может использоваться для других целей. Преобразование двоичного кода в защищенный циклический и рекуррентный рассмотрено в гл. 3.

9.4. МОДУЛЯТОРЫ, ДЕМОДУЛЯТОРЫ, МОДЕМЫ

Модулятором называется устройство, осуществляющее модуляцию сигналов, а демодулятором — устройство, осуществляющее демодуляцию, т. е. обратное преобразование — выделение модулирующей функции времени (см. § 1.4). При модуляции спектр частот переносится в область более высоких частот модулируемой функции — переносчика $u(t)$, а при демодуляции производится восстановление модулирующей функции $\lambda(t)$, т. е. перенос спектра частот в область более низких частот этой функции (см. рис. 1.6, 1.11 и 1.12).

Модуляторы во многих случаях применяются для согласования сигнала с каналом связи по передаваемым частотам, например, если сигнал содержит спектр частот, начиная от нуля, а типовой канал пропускает более высокие частоты. Модуляция также применяется для повышения помехоустойчивости и стабильности коэффициента передачи в измерительных системах (например, с частотной модуляцией). Принципиальные схемы простейших амплитудных

модуляторов — диодного кольцевого и вибрационного, применяемого в автоматических регуляторах, приведены на рис. 9.29 и 9.30.

Амплитудные модуляторы имеют существенное нелинейное звено в виде диодов (рис. 9.29) или вибрационного преобразователя (рис. 9.30). Могут быть использованы и другие нелинейные элементы (транзисторы, электрические лампы, микросхемы и т. д.). При использовании симметричных схем (рис. 9.29 и 9.30) нелинейные искажения модулятора резко уменьшаются, так как в симметричных

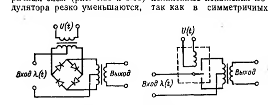


Рис. 9.29. Принципиальная схема диодного кольцевого амплитудного модулятора

Рис. 9.30. Принципиальная схема контактного вибрационного амплитудного модулятора.

схемах отсутствуют или подавлены четные гармоники. На выходе модулятора включается полосовой фильтр, пропускающий модулируемую частоту и боковые частоты, вызванные модуляцией функцией $\lambda(t)$. Фильтр не пропускает высшие гармоники модулируемой частоты и комбинационные частоты, возникающие при параллельном включении нескольких модуляторов (перекрестные искажения, см. рис. 1.17 и 1.18).

Схемы, приведенные на рис. 9.29 и 9.30, могут быть использованы и как демодуляторы. В этом случае выход и вход меняются местами, а с первоначального входа снимается модулирующая функция $\lambda(t)$. На такой модулятор необходимо подавать то же модулирующее колебание $u(t)$ с той же частотой и фазой, что затрудняет реализацию демодулятора в системах телемеханики с модулятором и демодулятором, находящимися на расстоянии. Отметим, что такие демодуляторы обладают резкоповышенной помехоустойчивостью, так как несинхронные помехи подавляются.

Если модулятор и демодулятор находятся на расстоянии, то применяются более простые амплитудные демодуля-

торы в виде последовательно включенных детектора и фильтра нижних частот, который не пропускает частот модулируемой частоты и кратных ей. Принципиальные схемы простейших широко применяемых однополупериодного и двухполупериодных диодных демодуляторов (детекторов) с фильтром нижних частот в виде простейшей RC-цепи приведены на рис. 9.31. Для работы этих схем не требуется

Рис. 9.31. Принципиальные схемы амплитудных детекторов (демодуляторов) однополупериодного (*а*), двухполупериодного (*б*) и с диодным мостом (*в*).

Рис. 9.32. Принципиальная схема симметричного частотного демодулятора с расстроенными LC-контурами.

модулируемое колебание $u(t)$, и в результате детектирования и фильтрации выделяется огибающая модулированных колебаний $\lambda(t)$, что и показано на рис. 1.11.

В качестве частотного модулятора (ЧМ) используется синусоидальный управляемый по частоте генератор, а в качестве частотно-импульсного модулятора (ЧИМ) — управляемый по частоте импульсный генератор, например мультивибратор. При частотной демодуляции в качестве частотного демодулятора широко используются один или два колебательных RC-контура, расстроенных относительно несущей частоты. На рис. 9.32 приведена симметричная схема частотного демодулятора с двумя расстроенными колебательными контурами L_1C_1 и L_2C_2, а на рис. 9.33, *а* — резонансные характеристики первого *1* и второго *2* колебательных контуров. При отсутствии частотной модуляции рабочая точка выбирается по частоте, соответствующей точке f_0, а выходное напряжение демодулятора равно разности напряжений на контурах. Выходная характеристика демодулятора приведена на рис. 9.33, *б*, а выходное напряжение демодулятора при подаче на вход частотно-модулирован-

ного колебания с частотой девиации $f_д$ (рис. 9.33, *а*) изображено на рис. 9.33, *в*.

На выходе частотного демодулятора включены выпрямители на диодах и фильтр нижних частот, не пропускающий модулируемую частоту f_0 и кратные ей высшие частоты. Емкость конденсаторов связи $C_{св}$ выбирается достаточно малой для устранения взаимной связи между контурами. Модулируемая частота f_0 обычно выбирается во много раз большей модулирующей частоты $f_м = 1/T_м$ (рис.

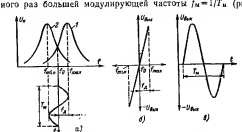


Рис. 9.33. Резонансные характеристики (*1* и *2*) и входное ЧМ-колебание контура (*а*), выходная характеристика (*б*) и выходное напряжение демодулятора (*в*).

9.33, *а*), т. е. $f_0 \gg f_м$. Коэффициент передачи таких модуляторов и демодуляторов может быть высокостабильным, а изменение затухания канала связи мало влияет на стабильность суммарного коэффициента передачи, что используется в системах телеизмерений, в магнитографах и других устройствах.

Модемом называется совокупность модулятора и демодулятора. В качестве примера сравнительно простого частотного модулятора-демодулятора (модема) и их полосовых фильтров рассмотрим аппаратуру каналов телемеханики с активными *RC*-фильтрами, разработанную в институте ВНИИЖТ для уплотнения телефонных каналов узкополосными каналами телемеханики [29]. Аппаратура разработана на основе интегральной гибридной технологии, отличается повышенной стабильностью, имеет небольшие габариты, относится к наиболее экономичной и выпускается промышленностью.

Таблица 9.4

Номер канала	f_0, Гц	Δf, Гц	R_F, имп./с	Номер канала	f_0, Гц	Δf, Гц	R_F, имп./с
1	269	62	12	8	1182	230	35
2	339	78	12	9	1436	279	35
3	424	98	16	10	1743	338	35
4	534	124	16	11	2115	411	35
5	661	128	20	12	2568	499	35
6	802	156	20	13	3118	606	35
7	974	189	20	14	3785	735	35

Полосовые активные *RC*-фильтры имеют затухание по соседнему каналу примерно 50 дБ при коэффициенте прямоугольности на уровне 50 дБ не менее 0,3—0,4, которое можно получить только с помощью полосовых фильтров высокого порядка. В передающем устройстве использованы фильтры 10-го, а в приемном —12-го порядка. При разработке большое внимание уделялось высокой стабильности активных фильтров, генераторов и усилителей и в особенности температурной и временной стабильности полосовых фильтров.

Так, применение специальных тонкопленочных резисторов и высокостабильных бескорпусных конденсаторов типа К10-9 группы П33 позволило получить стабильность *RC*-цепи $\pm$ (0,3—0,5) % в заданном интервале частот, т. е. повысить стабильность в 2—3 раза по сравнению с фильтрами на основе альсиферовых сердечников. Применение активного *RC*-фильтра на основе интеграторов позволило свести влияние других компонентов схемы и коэффициентов усиления на стабильность до 0,1—0,2 %.

Для повышения скорости передачи в диапазоне частот от 300 до 600 Гц коэффициент пропорциональности размещения частот в этом диапазоне выбран несколько большим. В табл. 9.4 приведены средние частоты f_0, полосы пропускания каналов Δf и допустимая скорость передачи R_F.

Для уменьшения нестабильности фильтров при температурах от —30 до —50 °C, которые в большей степени влияют на нестабильность, в платах приемного и передающего устройств установлены нагревательные элементы — резисторы, которые могут автоматически включаться и повышать температуру блока на 20 °C.

Принципиальная схема передающего устройства, состоящего из генератора несущей частоты, частотного манипулятора, полосового фильтра и усилителя мощности, приведена на рис. 9.34 [29].

Генератором несущей частоты служит активный RC-фильтр, между входом и выходом которого включен канал

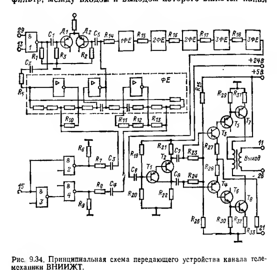


Рис. 9.34. Принципиальная схема передающего устройства канала телемеханики ВНИИЖТ.

положительной нелинейной обратной связи. Повышение стабильности частоты генератора достигается путем ограничения по уровню сигнала положительной обратной связи. Канал обратной связи состоит из последовательно включенного ограничителя на диодах $Д_1$ и $Д_2$, который подключен ко входу и выходу RC-фильтра $ФЕ$ через разделительные конденсаторы C_1, C_2 и C_5 соответственно. Уровень обратной связи задается резистором R_5.

Запуск генератора осуществляется через элемент ИЛИ-НЕ *1*. Для запуска генератора необходимо закрыть элемент *1* по одному из входов (*13* или *29*). При открытом элементе *1* колебания генератора отсутствуют, так как канал обратной связи шунтируется этим элементом.

Частотная манипуляция осуществляется путем непосредственного воздействия на генератор через элементы ИЛИ-НЕ (*2—4*) и резисторы R_6 и R_9, представляющие собой манипулятор и подключенные к *RC*-фильтру через резисторы R_7, R_8 и конденсаторы C_3, C_4 соответственно. При положительном напряжении на входе *15* элементы ИЛИ-НЕ *2* и *3* закрыты, а элемент *4* открыт и на выходе генератора будет частота $f_0+\Delta f$. Если элементы ИЛИ-НЕ *2* и *4* закрыты, то на выходе генератора частота равна f_0. Выбор значения частоты, на которое она изменяется при манипуляции ($\pm\Delta f$), осуществляется с помощью резисторов R_7 и R_8 соответственно. При отрицательном напряжении на входе *15* элементы *2*, *3* открыты, а *4* закрыт и частота генератора $f_0-\Delta f$.

Рис. 9.35. Амплитудно-частотная характеристика выходного полосового фильтра передающего устройства.

В модуле передатчика установлены три микромодуля *RC*-фильтров, каждый из которых имеет два элемента *ФЕ*, обведенных пунктиром. Один из этих элементов работает в режиме автогенератора, а остальные пять включены последовательно и образуют 5-элементный активный *RC*-фильтр, включенный на выходе передающего устройства. Для получения заданной амплитудно-частотной характеристики (рис. 9.35) элементы фильтра *ФЕ* настраиваются с расстройкой $\pm\Delta f$ относительно средней частоты f_0: два на частоту $f_0-\Delta f$, два следующих на частоту $f_0+\Delta f$, а пятый на частоту f_0. При повреждении любого из элементов *ФЕ* пятый элемент можно перестроить на частоту поврежденного элемента, который при этом выключается.

Для всех *RC*-элементов *ФЕ* выбрано одинаковое значение Δf, что несколько ухудшает амплитудно-частотную характеристику фильтра (рис. 9.35), но позволяет сократить число типов *RC*-элементов. Это облегчает монтаж и настройку аппаратуры. Элементы *ФЕ* настраиваются до их

установки в модуль передающего устройства. В модуле предусмотрены гнезда для подсоединения подстроечных резисторов R_{10}—R_{13}, с помощью которых можно изменять частоту и добротность RC-элементов (при эксплуатации). Согласование уровней сигналов в элементах фильтра $ФЕ$

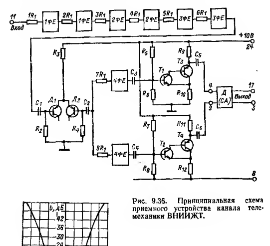


Рис. 9.36. Принципиальная схема приемного устройства канала телемеханики ВНИИЖТ.

Рис. 9.37. Амплитудно-частотная характеристика входного полосового фильтра и приемника.

осуществляется с помощью резисторов R_{14}—R_{18}. Усилитель мощности работает по двухтактной схеме и состоит из навесных элементов. Его выходная мощность 100—150 мВт.

Принципиальная схема приемного устройства, состоящего из входного полосового RC-фильтра, дискриминатора и двух амплитудных детекторов, приведена на рис. 9.36. В

модуле приемного устройства установлены четыре микромодуля ΦE, три из которых образуют 6-элементный последовательный, полосовой RC-фильтр с амплитудно-частотной характеристикой, приведенной на рис. 9.37.

Амплитудно-частотная характеристика фильтра формируется примерно так же, как и характеристика фильтра в передающем устройстве. Элементы фильтра ΦE настраиваются с расстройкой на $\pm\Delta f$ относительно средней частоты f_0. Уровни сигналов на элементах ΦE согласуются путем выбора сопротивлений резисторов $1R_1$—$6R_1$ так, чтобы ни один из элементов фильтра не работал в режиме насыщения. Четвертый микромодуль с двумя RC-элементами ΦE используется в частотном дискриминаторе (демодуляторе).

Фильтры дискриминатора подключены к входному полосовому фильтру через ограничитель на диодах $Д_1$ и $Д_2$, который выполняет функции амплитудного ограничителя. Последний устраняет влияние изменения уровня принимаемых из канала связи сигналов на процесс демодуляции ЧМ сигнала и тем самым предотвращает искажение выходных сигналов (см. гл. 3). Порог ограничения регулируется с помощью резистора R_3.

Частотный демодулятор преобразует частотно-модулированный сигнал в модулированный по интенсивности сигнал постоянного тока. Один из фильтров демодулятора, включенных параллельно, настроен на частоту $f_0-\Delta f$, а второй — на частоту $f_0+\Delta f$. При приеме сигнала с частотой $f_0-\Delta f$ на выходе первого фильтра будет значительно большее напряжение по сравнению с выходным напряжением второго фильтра. Если на вход приемного устройства приходит сигнал с частотой $f_0+\Delta f$, то на выходе второго фильтра дискриминатора будет значительно большее напряжение по сравнению с выходным напряжением первого фильтра.

Амплитудные детекторы выполнены в виде отдельного гибридного микромодуля $Д$ (элемент CA), включенного на выходе приемного устройства, и преобразуют амплитудно-модулированный сигнал в сигнал постоянного тока, изменяющийся по уровню (по интенсивности).

Элемент CA (см. рис. 9.36) состоит из фазоинверторов, мостовых выпрямителей, сглаживающих RC-цепей, нуль-индикаторов и выходных усилителей. Выбранная дифференциальная схема малочувствительна к помехам при отсутствии сигнала. Напряжение на выходе приемного уст-

ройства присутствует только в полосе частот дискриминатора и отсутствует вне этой полосы, а также на частоте f_0. Это повышает помехоустойчивость и достоверность приема сигналов. Модулятор и демодулятор (модем) могут работать также с трехпозиционным сигналом (см. гл. 3).

При передаче данных основным назначением модемов является не только рассмотренное выше согласование частотных характеристик сигналов с частотными характеристиками каналов связи, но и повышение достоверности и скорости передачи информации по каналу связи.

Большинство таких модемов выполняет функции, связанные с параметрическими методами повышения помехоустойчивости сигналов, синхронизацией, диагностикой, управляющими функциями и стыковкой сигналов. Повышение помехоустойчивости параметрическими методами достигается путем контроля качества формы передаваемых импульсов, коррекции формы импульсов, их временных сдвигов и т. д.

Выполнение перечисленных функций приводит к тому, что реальные модемы для передачи данных представляют собой сравнительно сложные устройства и отражают специфику каналов Министерства связи. С учетом изложенного ограничимся кратким рассмотрением модемов для передачи данных. Модемы классифицируются по следующим наиболее важным признакам [12]:

1) скорости передачи данных — низкоскоростные (до 300 бит/с), среднескоростные (до 9600 бит/с) и высокоскоростные (свыше 9600 бит/с);

2) виду модуляции (с частотной, фазовой, амплитудной и комбинированной модуляцией);

3) методу передачи сигналов (синхронные и асинхронные);

4) стыковке с каналом связи (последовательные и параллельные);

5) типу канала связи (для коммутируемых и некоммутируемых телефонных, телеграфных каналов и физических цепей);

6) способу работы (симплексные, полудуплексные и дуплексные);

7) способу сопряжения с каналом связи (электрические и акустические).

Таблица 9.5

Модем, УПС, ЕС ЭВМ	Используемые каналы	Скорость передачи, бит/с	Вид модуляции и метод передачи	Страна изготовитель
Модем-200 ЕС-8001 ЕС-8002	Коммутируемые и некоммутируемые ТФ каналы и физические цепи	 До 200 До 200	ЧМ	НРБ, СССР, ВНР, ГДР, ЧССР
Модем-1200 ЕС-8005 ЕС-8006	То же	 600 1200	ЧМ	НРБ, СССР, ВНР, ПНР, СССР
Модем-2400 ЕС-8010 ЕС-8011	Некоммутируемые ТФ каналы	 600 1200, 2400	Двойная относительная ФМ	СССР, ВНР
Модем-4800 ЕС-8015	То же	 2400, 4800	Тройная относительная ФМ и ЧМ	СССР
Модем-4800 ЕС-8019	Некоммутируемые первичные широкополосные каналы	2400, 4800	Псевдотроичная АМ	СССР
Параллельный модем ЕС-8025	Коммутируемые и некоммутируемые ТФ каналы	20 или 40 знаков/с	Параллельная многочастотная передача	ЧССР
УПС с низким уровнем ЕС-8027 ЕС-8028	Физические цепи небольшой длины	До 4800 До 9600	Передача видеоимпульсами с низким уровнем	НРБ, ВНР, ЧССР
УПС телеграфного типа	Некоммутируемые телеграфные каналы	До 200	Передача видеоимпульсами с низким уровнем	НРБ
ЕС-8030 ЕС-8032	Некоммутируемые и коммутируемые телеграфные каналы	До 200	Передача видеоимпульсами	ЧССР

В табл. 9.5 приведены основные характеристики модемов и устройств преобразования сигналов (УПС), разработанных в рамках Единой системы электронных вычислительных машин (ЕС ЭВМ, [12]). Все они имеют электрическое сопряжение с каналом связи.

Рассмотрим в качестве примера модем 4800, разработанный для ЕС-8015. Модем работает со скоростью 2400 или 4800 бит/с в синхронном режиме по прямому каналу с фазовой модуляцией и одновременно в асинхронном режиме по обратному каналу со скоростью до 75 бит/с с частотной модуляцией. Его функциональная схема приведена на рис. 9.38.

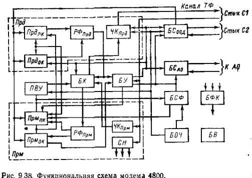


Рис. 9.38. Функциональная схема модема 4800.

Информационные импульсы от оборудования обработки данных (ООД) со входа *Стык С2* через блок сопряжения $БС_{ООД}$ подаются в передатчик прямого канала $Прд_{ПК}$ и преобразуются в фазомодулированный сигнал. Одновременно с того же входа *Стык С2* на передатчик обратного канала $Прд_{ОК}$ подаются импульсы для передачи по обратному каналу и преобразуются в нем в частотно-модулированные сигналы. Суммарный сигнал с фазовой и частотной модуляцией с выхода разделительных фильтров

передающей части $РФ_{Прд}$ с помощью блока коммутации *БК* подается на передающую часть частотного корректора $ЧК_{Прд}$ и далее в канал связи через *Стык С1*.

Принимаемые из канала связи модулированные сигналы через *Стык С1* подаются в приемную часть частотного корректора $ЧК_{Прм}$, с помощью которого совместно со схемой настройки *СН* выравнивается неравномерность группового времени замедления телефонного канала при числе переприемов от одного до шести. Так же выравниваются амплитудно-частотные характеристики соединительных линий.

Суммарный сигнал с выхода частотного корректора $ЧК_{Прм}$ поступает через блок коммутации *БК* на разделительный фильтр приемника $РФ_{Прм}$, в котором разделяются частотно- и фазо-модулированные сигналы и поступают в приемники прямого $Прм_{ПК}$ и обратного $Прм_{ОК}$ каналов. В приемниках осуществляется домодуляция фазо-модулированных (в $Прм_{ПК}$) и частотно-модулированных (в $Прм_{ОК}$) сигналов, а выходные информационные видеоимпульсы подаются на ООД через блок сопряжения $БС_{ООД}$ и *Стык С2*.

Для преобразования спектра принимаемого сигнала путем синхронного детектирования и регенерации опорные сигналы и сигналы несущей и тактовых частот формируются блоками опорных частот *БОЧ* и блоком синхронизации и фазирования *БСФ*.

Исходная частота 4147,2 кГц генерируется кварцевым генератором в *БОЧ*. Блок синхронизации и фазирования *БСФ* состоит из двух функциональных узлов, формирующих когерентное колебание для синхронного детектирования и колебание тактовой частоты

Обмен сигналами модема с ООД и аппаратурой обслуживания *АО* осуществляется блоками сопряжения $БС_{ООД}$ и $БС_{АО}$ соответственно. С помощью блока функционального контроля *БФК* отыскивают неисправности модема. Все управляющие сигналы поступают от блока управления *БУ*, а питающие напряжения — от блока выпрямителей *БВ*.

Телефонные переговоры по каналу связи осуществляются при отсутствии передачи данных с помощью переговорно-вызывного устройства *ПВУ*. Для вызова оператора оконечного пункта посылается сигнал тональной частоты 2600±20 Гц. Габариты модема 600×580×655 мм. Основой элементной базой модема служат интегральные микросхемы серии 217.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

10.1. СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И ПЕРЕСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

Счетчиком импульсов называется функциональный узел, осуществляющий счет подаваемых на его вход импульсов в определенной системе счисления (двоичной, двоично-десятичной, десятичной и др., см. гл. 3). Название счетчика дается по системе счисления. Различают двоичные, десятичные, двоично-десятичные счетчики и др.

Счетчики импульсов относятся к широко применяемым функциональным узлам цифровых устройств. Электронные счетчики импульсов, рассматриваемые в данном параграфе, состоят из электронных схем с двумя устойчивыми состояниями и специальными соединениями. В таких электронных схемах используются триггеры со счетным входом. Промышленность выпускает счетчики импульсов в виде интегральных микросхем.

Близкие к счетчику функции выполняет пересчетная схема, осуществляющая деление числа подаваемых на ее вход импульсов в заданное число раз. Пересчетные схемы применяются в счетчиках, делителях частоты импульсов, распределителях с диодной матрицей и т. д. Они имеют следующие важнейшие характеристики:

к о э ф ф и ц и е н т п е р е с ч е т а $K_{пр}$, показывающий, какое число импульсов необходимо подать на вход схемы, чтобы на ее выходе появился один импульс:

$$K_{пр} = N_{вх}/N_{вых}. \quad (10.1)$$

Для $N_{вых}=1$ $K_{пр}=N_{вх}$.

Пересчетная схема называется двоичной пересчетной, если каждое ее звено имеет $K_{пр}=2$, и декадной, если $K_{пр}=10$. Двоичная пересчетная схема представляет собой цепочку последовательно включенных триггеров со счетными входами;

м а к с и м а л ь н а я с к о р о с т ь с ч е т а, характеризуемая наибольшей частотой, которую может считать пересчетная схема. Современные двоичные пересчетные схемы на триггерах с высокочастотными транзисторами имеют максимальную скорость счета порядка нескольких сотен мегагерц, а на интегральных микросхемах — еще выше.

Несколько меньшие скорости счета имеют двоичные счетчики на туннельных диодах;

разрешающая способность счетчика, характеризуемая минимальным интервалом времени τ_p между двумя импульсами, которые может сосчитать пересчетная схема (при непериодической последовательности импульсов). Импульсы с меньшим интервалом времени между ними схема может пропускать. В реальных схемах $1/\tau_p$ меньше максимальной скорости счета.

Широко применяются пересчетные схемы из последовательно включенных триггеров со счетными входами и

Рис. 10.1. Схема 3-разрядного двоичного счетчика на триггерах Tr_1 — Tr_3.

дополнительными формирующими цепочками связи между триггерами (рис. 10.1). Каждая переходная дифференцирующая *RC*-цепочка формирует импульс при переходе триггера из состояния 1 в состояние 0. Четыре последовательно включенных триггера со счетными входами представляют собой двоичный счетчик с коэффициентом пересчета $K_{пр}=16$. Дополнительные связи между триггерами уменьшают коэффициент пересчета до 10.

Известно около 35 способов уменьшения кратности пересчетной схемы, состоящей из четырех триггеров, с 16 до 10, однако широкое применение получило только несколько таких способов. На рис. 10.2, *а* приведена одна из таких схем с $K_{пр}=10$ (двоично-десятичная декада), а на рис. 10.2, *б* — ее временная диаграмма.

После восьмого входного импульса триггер $Тг_3$ будет в состоянии 1 (см. рис. 10.2, *б*). Триггер $Тг_1$ после этого уже не должен переходить в состояние 1, так как цепь связи между $Тг_0$ и $Тг_1$ будет нарушена уже при переходе восьмого импульса. Связь между $Тг_0$ и $Тг_1$ осуществляется через схему $ИЛИ_1$ (1 на рис. 10.2, *а*). Как только $Тг_3$ перейдет в состояние 1, через схему $ИЛИ_1$ будет подана 1 на вход триггера $Тг_1$, который запретит подготовку $Тг_1$ к срабатыванию при приходе девятого импульса. Следовательно, при переходе триггера $Тг_0$ из 1 в 0 на десятом (нулевом) такте $Тг_1$ не перейдет в состояние 1, а останется в состоянии 0.

Для стирания 1 на десятом такте (импульсе) предусмотрена обратная связь триггеров $Tг_0$ и $Tг_3$ через схему $ИЛИ_2$ и дифференцирующую цепочку. На девятом такте $Tг_0$ и $Tг_3$ устанавливаются в состояние 1, а на входы схемы $ИЛИ_2$ подаются отрицательные потенциалы (0), что приводит к подготовке дифференцирующей цепочки. Как только десятый импульс установит $Tг_0$ в состояние 0, дифференцирующая цепочка на входе схемы И сработает и $Tг_3$ перейдет в состояние 0, т. е. все триггеры перейдут в исходное нулевое состояние.

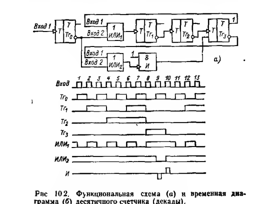


Рис 10.2. Функциональная схема (а) и временная диаграмма (б) десятичного счетчика (декады).

Счетчик с коэффициентом пересчета $K_{пр}=1000$ состоит из трех однинаковых декад, а счетчик с $K_{пр}=10^m$ — из m декад, где m — целое положительное число

Применяется также включение триггеров по кольцевой схеме без использования счетных входов. В таком счетчике, называемом кольцевым, только один триггер в каждый момент времени находится в открытом состоянии. В результате уменьшается мощность, потребляемая счетчиком, причем она не зависит от числа ячеек в кольце. Кольцевые счетчики, однако, требуют большего числа элементов.

Для счета импульсов применяются также специальные электронные приборы — декатроны и трохотроны. Декатрон выполняет одновременно функции счетной декады и цифрового индикатора. Это газоразрядный прибор с разрядным промежутком, одни зажженный участок которого сдвигается по окружности на один шаг с приходом каждого последующего импульса и служит индикацией соответствующей десятичной цифры в данной декаде (рис. 10.3). Разрешающая способность декатронов достигает $\tau_р = 10$ мкс.

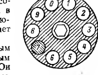


Рис 10.3 Декада цифрового табло декатрона

Трохотрон относится к вакуумным электронным приборам с электронным лучом, движущимся по трохоиде. Он также выполняет функции декады. Разрешающая способность трохотронных счетчиков 1—3 мкс, а специальных трохотронов 0,1 мкс. Типовые двоичные и двоично-десятичные счетчики на интегральных микросхемах, например, серии К-155 имеют максимальную частоту 10 мГц, а высокочастотных серий — значительно выше.

10.2. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (АЦП)

Аналого-цифровым преобразователем называется функциональный узел, однозначно преобразующий значение аналоговой величины в цифру заданного цифрового кода, т. е. преобразователь *аналоговой формы представления* информации в цифровую. Преобразование осуществляется в течение определенного интервала времени T, а результат преобразования может быть представлен в виде кодовых комбинаций параллельного и, реже, последовательного цифрового кода. Широко применяется преобразование в двоичный и двоично-десятичный код в соответствии с выбранной системой счисления. Преобразователи *аналог — цифра* применяются в измерительной и телеизмерительной технике и в области связи при импульсно-кодовых методах передачи речи. Преобразователи *аналог — цифра* также называются преобразователями *аналог — код*. Такое название менее строгое, так как коды могут быть и невзвешенными (не цифровыми, см. гл. 3).

Возможны различные способы преобразования непре-

рывной (аналоговой) величины в цифровой код. Известна классификация преобразователей по принципам действия, согласно которой применяют следующие основные четыре метода преобразования аналог — цифра: время-импульсный, частотно-импульсный, следящего уравновешивания, пространственного кодирования (преобразования). Преобразователи, основанные на методе пространственного кодирования, получили также название шифраторов перемещений (угловых или линейных).

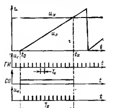


Рис. 10.4. Временные диаграммы сигналов время-импульсного преобразователя.

Используются и другие классификации, которые более детально рассматриваются в цифровых измерительных устройствах.

Время-импульсный метод заключается в предварительном линейном преобразовании значения измеряемого параметра во временной интервал и непосредственном кодировании временного интервала. Для этого мгновенное значение измеряемой величины u_x (рис. 10.4) преобразуется в пропорциональный этому значению интервал времени T_x, например, путем запуска в момент t_0 линейно возрастающего напряжения $u_л = kt$ и срабатывания нуль-органа в момент t_x при

$$u_л = kT_x = u_x. \qquad (10.2)$$

В течение измеряемого интервала времени T_x на счетчик поступают импульсы образцовой (стабильной) частоты $f_c = 1/T_c$ и производится счет импульсов в заданной системе счисления (см. гл. 3). Выбор системы счисления однозначно связан с применяемым цифровым кодом. Соответственно используется двоичный, двоично-десятичный, десятичный или другой счетчик числа импульсов.

Отметим, что включение генератора импульсов в течение интервала T_x (рис. 10.4) является простейшим видом кодирования с использованием последовательного число-импульсного кода, а включение счетчика этих импульсов можно рассматривать как перекодирование в двоичную, двоично-десятичную или другую систему счисления в зависимости

от типа счетчика. При этом на счетчике производится запоминание кодовой комбинации, т. е. представление измеряемого значения в параллельном коде.

Для перевода в последовательный код, например при передаче кодовой комбинации по каналу связи, производится считывание информации со счетчика с определенной скоростью. Минимальное время запаздывания $T_{3\,min}$ при преобразовании и передаче кодовой комбинации время-импульсным методом будет:

$$T_{3\,min} = T_x + T_{сч}, \tag{10.3}$$

где $T_{сч}$ — время считывания кодовой комбинации со счетчика.

Если выбор минимального значения T_x для номинального значения измеряемой величины определяется максимально возможной скоростью линейной развертки (рис. 10.4), быстродействием нуль-органа (компаратора) и максимальной скоростью счета импульсов, то выбор времени считывания $T_{сч}$ определяется полосой пропускания канала связи, через который передаются кодовые комбинации, т. е. $T_{сч} \geqslant n/\Delta f$, где Δf — полоса пропускания канала связи, n — число разрядов кода.

Описание время-импульсного метода было дано на примере преобразования напряжения u_x в интервал времени T_x с линейно возрастающим напряжением. В общем случае может быть выбрано преобразование любой другой величины (тока, сопротивления, емкости, механического перемещения и т. п.) в интервал времени T_x. Так, в устройстве телеизмерений НИПИнефтехимавтомат (см. § 13.1) используется преобразование угла поворота в интервал времени T_x.

Погрешность преобразований при время-импульсном методе преобразования аналог — цифра зависит от нелинейности и стабильности нарастания напряжения $u_л$ (или другой величины), а также от погрешности квантования, схемы сравнения и стабильности частоты генератора.

Существуют различные способы реализации время-импульсных преобразователей аналог — цифра. Одна из распространенных структурных схем такого преобразователя с входным напряжением u_x приведена на рис. 10.5. Здесь по команде управляющего устройства *УУ* на орган сравнения *СО* (нуль-орган) с генератора линейно изменяющегося напряжения *ГЛИН* подается линейно возрастающее напряжение $u_л$ (см. рис. 10.4) и одновременно запускается счет-

чик *Сч* для счета импульсов от генератора импульсов *ГИ* со стабильной частотой. В момент, когда

$$u_л = kT_x = u_x, \tag{10.4}$$

орган сравнения СО выдает на электронный ключ *Кл* импульс и счетчик *Сч* останавливается. На выходе счетчика включается устройство индикации, регистрации или считывания кодовой комбинации.

На вход время-импульсного преобразователя аналог-цифра может подаваться унифицированное напряжение, изменяющееся, например, от 0 до 1 В (от различных первичных преобразователей). Масштабирование производится путем выбора частоты генератора *ГИ*.

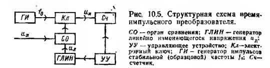


Рис. 10.5. Структурная схема время-импульсного преобразователя.

СО — орган сравнения; *ГЛИН* — генератор линейно изменяющегося напряжения $u_л$; *УУ* — управляющее устройство; *Кл* — электронный ключ; *ГИ* — генератор импульсов стабильной (образцовой) частоты f_0; *Сч* — счетчик.

Метод время-импульсного преобразования позволяет создавать наиболее высокоточные преобразователи аналог-цифра с электрическим входом, но не с максимальным быстродействием. Время-импульсные преобразователи аналог-цифра используются в приемниках с цифровой индикацией при аналоговой передаче сигналов ВИМ и ШИМ через канал связи или на передающей стороне в кодо-импульсных устройствах телеизмерения.

Время-импульсное преобразование аналог-цифра получило также название развертывающего преобразования. К разновидности развертывающего преобразования относится преобразование со ступенчатой формой возрастающего напряжения. В отличие от описанного выше время-импульсного преобразования непрерывно возрастающее напряжение $u_л$ заменяется ступенчато-возрастающим напряжением, например, с постоянным шагом квантования $\Delta u_{кв}$. Временна́я диаграмма образцового развертывающего напряжения $u_{вк}$ такого преобразования приведена на рис. 10.6, а его структурная схема — на рис. 10.7.

По команде управляющего устройства *УУ* (рис. 10.7) открывается электронный ключ *Кл* и от генератора импульсов *ГИ* подаются импульсы одновременно на источник ком-

пенсирующего напряжения *ИКН* и на счетчик импульсов *Сч*. С приходом каждого нового импульса напряжение на выходе источника компенсирующего напряжения увеличивается на значение, равное шагу квантования $\Delta u_{кв}$. Счет импульсов останавливается органом сравнения СО, вырабатывающим импульс в момент, когда $u_x = u_{кв}$ (рис. 10.6). Импульс с органа сравнения *СО* запирает электронный ключ *Кл* и приводит схему в исходное состояние.

В отличие от рассмотренного выше время-импульсного преобразования аналог-цифра с линейной разверткой здесь частота генератора импульсов может изменяться в широких пределах, не приводя к существенным погрешностям. Однако предъявляются высокие требования к стабильности ступеньки напряжения (шага квантования) $\Delta u_{кв}$ (рис. 10.6). Относительная погрешность при этом равна относительному изменению $\Delta u_{кв}$. Этот метод имеет сравнительно большое время преобразования, поэтому в быстродействующих устройствах не применяется.

Рис. 10.6. Временна́я диаграмма развертывающего напряжения ступенчатой формы.

Рис. 10.7. Структурная схема развертывающего преобразования.

СО — орган сравнения; *ИКН* — источник ступенчатого возрастающего компенсирующего напряжения; *Кл* — электронный ключ; *ГИ* — генератор импульсов; *УУ* — управляющее устройство; *Сч* — счетчик.

Частотно-импульсный метод преобразования аналог-цифра заключается в предварительном преобразовании измеряемого параметра x в пропорциональную ему частоту $F = kx$ и счете числа периодов этой частицы двоичным, двоично-десятичным или другим счетчиком в течение стабильного фиксированного промежутка времени T_0. Тип счетчика, так же как и ранее, определяется системой счисления. Минимальное время запаздывания $T_{з\,min}$ при передаче кодовых комбинаций и использовании частотно-импульсного метода преобразования

$$T_{з\,min} = T_0 + T_{сч}, \qquad (10.5)$$

где $T_{сч}$ — время считывания кодовой комбинации.

Выбор минимально допустимого значения T_0 определяется в низкочастотных системах погрешностью квантования $\delta_{кв}$ при измерении числа импульсов частоты F в течение промежутка времени T_0:

$$\delta_{кв} \leqslant 1/2N = 1/2FT_0, \qquad (10.6)$$

где $N = FT_0$ — число периодов частоты F в течение фиксированного промежутка времени T_0.

Рис. 10.8. Структурная схема частотно-импульсного преобразователя.

ГУ — генератор управляемой частоты; *ДИВ* — датчик интервалов времени; *УУ* — управляющее устройство; *Кл* — электронный ключ; *Сч* — счетчик.

Так, в системе телеизмерений ЦНИИКА при частоте $F = 20$ Гц и $T_0 = 5$ с $\delta_{кв} = 1/2 \cdot 20 \cdot 5 = 0{,}5\,\%$.

Погрешность измерений при частотно-импульсном методе преобразования аналог — цифра зависит от нелинейности и стабильности преобразования входного параметра x в частоту, а также от погрешности квантования и стабильности фиксированного промежутка времени T_0.

Структурная схема частотно-импульсного преобразователя аналог—цифра приведена на рис. 10.8. Здесь измеряемая величина x преобразуется в пропорциональную ей частоту $F = kx$ в управляемом генераторе ГУ. По команде устройства управления *УУ* с электронного ключа *Кл* подаются импульсы с частотой F на счетчик *Сч* в течение фиксированного промежутка времени T_0, задаваемого датчиком интервалов времени *ДИВ*.

Преобразователи напряжения или другого параметра в частоту впервые начали применяться при телеизмерениях еще в 30-х годах нашего столетия и используются в энергосистемах до настоящего времени. Однако частотно-импульсный метод преобразования аналог — цифра нашел применение в измерительной технике недавно.

В телеизмерениях также есть попытки использования этого метода, однако пока это приводит к более сложным и менее эффективным решениям, например, по сравнению с время-импульсным методом. Для работы частотных устройств ТИ по узкополосным каналам связи необходимо вы-

бирать сравнительно низкие частоты. Например, в частотно-импульсном устройстве ТИ ЦНИИКА с этой целью выбран диапазон частот 4—20 Гц. При этом для частоты $F_{max} = 20$ Гц и допустимой погрешности квантования $\delta_{кв} = 0{,}5$ % из (10.6) получим, что минимальное фиксированное время T_0 должно удовлетворять условию

$$T_0 \geqslant 1/2F\delta_{кв} = 5 \text{ с}.$$

В ряде случаев значение $T_0 = 5$ с не удовлетворяет требованию по быстродействию. Уменьшение этого времени может быть достигнуто путем умножения частоты, однако это усложняет аппаратуру. Заметим, что для аналогичного время-импульсного устройства погрешность квантования можно резко уменьшить путем выбора более высокой фиксированной частоты. Все это относится к частотным устройствам телеизмерения с цифровым отображением, в которых частотный преобразователь включается на передающей стороне, а телеизмеряемая величина пропорциональна частоте в канале связи. Для кодо-импульсных устройств с частотно-импульсным методом преобразования аналог — цифра на передающей стороне могут быть выбраны более высокие частоты, однако такой преобразователь не будет унифицированным.

Метод следящего уравновешивания (взвешивания) заключается в поочередном сравнении измеряемой величины u_x с суммой образцовых дискретных величин, изменяющихся по закону, определяемому выбранной системой счисления. Моменту окончания взвешивания соответствует равенство

$$u_x = u_{кв} = \Delta u_{кв} \sum_{i=0}^{n-1} K_i m^i, \qquad (10.7)$$

где $\Delta u_{кв}$ — напряжение, равное шагу квантования; K_i — коэффициент для двоичной системы счисления, равный 0 или 1 в зависимости от результатов сравнения на i-м такте; m — основание цифрового кода для двоичной системы счисления ($m = 2$); n — число разрядов.

Взвешивание (следящее уравновешивание) в данной системе счисления (см. гл. 3) производится с высшего разряда к более низшим, что приводит к более быстрому процессу взвешивания, занимающему число тактов (взвешиваний), равное числу разрядов кода n. В отличие от время-импульсного (развертывающего) преобразования здесь

компенсирующее напряжение может подходить к точке уравновешивания с двух сторон, а не с одной (рис. 10.9).

Для двоичного кода (10.7) можно записать в следующем виде:

$$u_x = u_{\text{кв}} = \Delta u_{\text{кв}} \sum_{i=0}^{n-1} K_i 2^i =$$

$$= \Delta u_{\text{нв}} (K_{n-1} \cdot 2^{n-1} + K_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \ldots + K_0 \cdot 2^0). \quad (10.8)$$

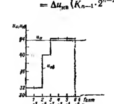


Рис. 10.9. Временная диаграмма напряжений для схемы на рис. 10.10.

Последовательность весовых коэффициентов K_{n-1}, K_{n-2}, K_1, K_0 представляет собой табличную запись кодовой комбинации этой величины.

В табл. 10.1 и на рис. 10.9 приведен числовой пример процесса взвешивания для $u_x = 43{,}6$ мВ, $\Delta u_{\text{кв}} = 1$ мВ.

Результаты измерения: в двоичном коде — 101100; в десятичном коде — 44.

Как видно из приведенных данных, после каждого такта (шага) добавочное выставляемое к сумме образцовое (опорное) напряжение уменьшается по двоичному закону.

Логика взвешивания на каждом такте заключается в следующем. На первом такте опорное напряжение

$$u_{\text{нв}} = 2^{n-1} \Delta u_{\text{кв}}. \quad (10.9)$$

Для $n = 6$ $\Delta u_{\text{кв}} = 10^{-3}$ В, $u_{\text{кв}1} = 2^{6-1} \cdot 10^{-3} = 32$ мВ.

Таблица 10.1

Номер такта	$u_{\text{нв}}$, мВ	$u_{\text{кв}} - u_x$, В	Коэффициент K_i
1	32	−11,6	1
2	32	−11,6	0
3	40	−3,6	1
4	44	+0,4	1
5	44	+0,4	0
6	44	+0,4	0

Далее процесс взвешивания аналогичен процессу преобразования десятичного числа в двоичное, он рассмотрен в § 3.2.

Процесс взвешивания продолжается до равновесия с максимальной абсолютной погрешностью

$$\Delta \leqslant \Delta u_{\text{кв}}/2. \qquad (10.10)$$

Точность измерений при взвешивании определяется числом разрядов и стабильностью дискретных значений образцового напряжения, а время уравновешивания

$$T_{\text{у}} = nT_{\text{т}}, \qquad (10.11)$$

где n — число разрядов кода; $T_{\text{т}}$ — длительность одного такта уравновешивания.

Для одинакового шага квантования $\Delta u_{\text{к}}$ и максимального значения

$$u_x = \Delta u_{\text{кв}} \sum_{i=0}^{n-1} 2^i;$$

$$T_{\text{р}} = T'_{\text{р}} \sum_{i=0}^{n-1} 2^i, \qquad (10.12)$$

где $T'_{\text{т}}$ — длительность такта при развертывающем преобразовании; $T_{\text{р}}$ — время измерения при развертывающем преобразовании.

Принимая $T_{\text{т}} = T'_{\text{т}}$, получаем:

$$T_{\text{р}}/T_{\text{у}} = 2^n/n. \qquad (10.13)$$

В частном случае при $n = 8$

$$T_{\text{р}}/T_{\text{у}} = 2^8/8 = 32.$$

Процесс измерения при следящем уравновешивании может быть совмещен с процессом передачи кодовой комбинации. В этом случае достаточно дополнительного времени запаздывания на считывание одного элемента кодовой комбинации, равного одному такту. Следовательно, такой преобразователь имеет наибольшее быстродействие. Время запаздывания в преобразователе

$$T_{\text{у з}} \approx T_{\text{т}} (n + 1). \qquad (10.14)$$

Структурная схема преобразователя со следящим уравновешиванием приведена на рис. 10.10. Измеряемое напряжение u_x в процессе измерения непрерывно сравнивается

с компенсирующим напряжением $u_к$ в органе сравнения *СО*, а программирующее устройство *ПУ* через цифро-аналоговый преобразователь *ЦАП* (преобразователь обратной связи — см. § 10.3) изменяет напряжение $u_к$ в каждом периоде тактового генератора *ГИ* по описанному выше закону до уравновешивания с максимальным значением абсолютной погрешности

$$\Delta \leqslant \Delta u_{кв}/2,$$

где $\Delta u_{кв}$ — абсолютная погрешность квантования.

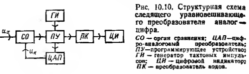


Рис. 10.10. Структурная схема следящего уравновешивающего преобразователя аналог — цифра.
СО — орган сравнения; *ЦАП* — цифро-аналоговый преобразователь; *ПУ* — программирующее устройство; *ГИ* — генератор тактовых импульсов; *ЦИ* — цифровой индикатор; *ПК* — преобразователь кодов.

Преобразователь кодов *КП* преобразует код АЦП в код цифрового индикатора *ЦИ*. При отображении результата измерения в устройстве цифровой индикации *ЦИ* запрещается индикация до окончания процесса взвешивания.

Промышленность выпускает быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП), использующие принцип следящего уравновешивания с частотой тактов выше 1 мГц, в том числе на интегральных микросхемах.

Метод пространственного преобраования (кодирования) основан на предварительном преобразовании значения измеряемого параметра в пропорциональное перемещение кодирующей маски относительно устройства считывания кода. Каждому пространственному положению соответствует своя кодовая комбинация цифрового кода на кодирующей маске. Перемещению, равному $K\Delta l_{кв}$, где $\Delta l_{кв}$ — перемещение на один шаг квантования, соответствует кодовая комбинация, отображающая число (см. гл. 3)

$$K = \sum_{i=0}^{n-1} K_i m^i. \qquad (10.15)$$

Кодовая комбинация импульсов для данного положения маски вырабатывается в процессе считывания информации с кодовой маски.

Пример кодирующей маски с натуральным 4-разрядным двоичным кодом, перемещаемой по вертикали и считываемой по горизонтали, дан на рис. 10.11. Такого рода маски с декартовыми координатами применяются, например, в специальных кодирующих электронно-лучевых трубках. При этом электронный луч отклоняется по вертикали под воздействием измеряемого напряжения u_x, а считывание кодовых комбинаций производится путем развертки луча по горизонтали.

В телеизмерениях более широко применяются кодирующие маски с угловыми координатами, конструктивно выполненные в виде кодирующих дисков или кодирующих секторов (см. рис. 3.7). Такой кодирующий диск укрепляется на ось первичного прибора (манометра, расходомера, ваттметра и т. п.).

Метод пространственного кодирования применяется чаще при измерении неэлектрических величин. В считывающем устройстве широко используется фотоэлектрический съем кодовых сигналов, например, с индивидуальными для каждого разряда (каждой дорожки) фотосопротивлениями или фотодиодами и осветителями, переключаемыми при считывании. Применяются также индуктивный, трансформаторный и другие способы съема кодовых сигналов, при которых требуется больший момент вращения на оси первичного прибора из-за электромагнитных процессов, что является недостатком и ограничивает их применение. Для уменьшения момента на оси первичного прибора при использовании этих методов применяют колебания повышенной частоты (высокой или верхней в диапазоне звуковых частот). Используются при этом индуктивный и трансформаторный способы съема кодовых сигналов и способ со срывом генерации высокочастотных колебаний.

Рис. 10.11. Маска с 4-разрядным двоичным кодом.

Метод пространственного кодирования широко применяется в радиолокации и военной технике для получения данных об угловых координатах целей или средств поражения непосредственно в цифровой форме. Такие преобразователи, называемые цифраторами перемещений, устанавлива-

ются на осях антенн, поворотных приспособлениях орудий, телескопов и т. п. Они позволяют осуществить преобразование угол поворота — цифра с более высокой точностью по сравнению с другими преобразователями аналог-цифра и могут иметь, например, 16 и более двоичных разрядов.

Как отмечалось в гл. 3, для устранения в кодирующих дисках больших погрешностей, возникающих на границах перехода от одних чисел к другим, применяются рефлексные

Рис. 10.12 Построение функциональной шкалы.

коды, в которых при переходе к соседнему числу изменяется только один разряд кода. Одним из широко применяемых рефлексных кодов является код Грея, относящийся к невзвешенным. Преобразование кода Грея в двоичный рассмотрено в гл. 9.

Для устранения граничных ошибок применяются также кодовые маски с натуральным двоичным или другим, не рефлексным кодом и специальные схемы считывания с кодовой маски. Одной из таких простейших схем является схема V-выбора, названная так по форме расположения считывающих органов. В таком устройстве каждый разряд натурального двоичного кода, за исключением первого, имеет два считывающих органа — A и B, напоминающих по расположению букву V (см. рис. 10.11). С увеличением номера разряда расстояние между считывающими органами A и B возрастает и равно 1/2 шага данного i-го разряда. Ось симметрии проходит по линии считывания перпендикулярно линии дорожек.

Информация считывается, начиная с младшего разряда, со следующей логикой. Если в предыдущем разряде считан 0, то в последующем разряде информация считывается с органа B; если в предыдущем разряде считана 1, то в последующем разряде считывание производится с органа A. На рис. 10.11 изображены органы считывания, расположенные на границе чисел *7* и *8*, где одновременно изменяются цифры во всех разрядах. Если орган A_1 считывает 1, то во всех остальных разрядах считывают органы A_2, A_3 и A_4 и формируется комбинация двоичного кода 0111. Если орган A_1 считывает 0, то во всех остальных разрядах считывают органы B_2, B_3 и B_4, т. е. формируется комбинация 1000.

Методы и технические средства пространственного кодирования получили широкое развитие не только применительно к линейным кодовым шкалам. При нелинейной зависимости перемещения (например, углового) и измеряемого параметра применяются специальные *функциональные кодовые шкалы*. В качестве примера на рис. 10.12 приведено построение 5-разрядной синусной шкалы. Шаг квантования $\Delta l_{кв}$ по шкале измеряемого параметра изменяется так, чтобы получить линейную зависимость между числом цифрового кода и значением входной функции.

В телеизмерениях функциональные шкалы применяются, например, при измерении расхода жидкости или газа, когда имеется квадратичная зависимость между углом поворота первичного прибора и значением изменяемого расхода.

10.3. ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ЦАП)

Цифро-аналоговым преобразователем называется функциональный узел, однозначно преобразующий кодовые комбинации цифрового кода в значения аналоговых величин, т. е. преобразователь одной формы представления информации в другую. Цифро-аналоговый преобразователь является обратным преобразователем аналого-цифрового преобразователя и применяется, например, в приемнике кодо-импульсных устройств телеизмерений для преобразования информации в аналоговую форму с целью ее отображения на показывающих приборах и самописцах.

Цифро-аналоговые преобразователи могут быть построены с бо́льшим быстродействием и меньшей погрешностью по сравнению с аналого-цифровыми. Они имеют более простое устройство. Поэтому ЦАП используются также в АЦП в цепи обратной связи (см. кодо-импульсное устройство те-

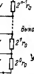


Рис. 10.13. Схема преобразователя цифра — аналог (сопротивление) с последовательно включенными резисторами.

леизмерений ЦНИИКА, § 13.2). При этом ЦАП в основном определяет погрешность и быстродействие АЦП. Ограничимся рассмотрением ЦАП с двухпозиционными параллельными кодами, применяемыми в телеизмерении.

К простейшим и наиболее широко применяемым ЦАП относится преобразователь цифровой код — сопротивление резистора. Схема такого преобразователя для n-разрядного двоичного кода приведена на рис. 10.13. Включая схему последовательно с источником стабилизированного тока, получаем преобразователь цифра — напряжение, а последовательно с источником стабилизированного напряжения — преобразователь цифра — ток. Электронные или контактные ключи на рис. 10.13 размыкаются, если соответствующий коэффициент i-го разряда двоичного кода $a_i = 1$, и замыкаются, если a_i равен 0. Для этого цепи их управления подключаются к соответствующим разрядам двоичного или другого счетчика.

Уравнение ЦАП с последовательно включенными резисторами для натурального двоичного кода имеет вид:

$$R_{\text{вых}} = r_0 \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i, \qquad (10.16)$$

где r_0 — сопротивление резистора, соответствующее шагу квантования и равное значению резистора для кодовой комбинации 2^0.

Выходная проводимость ЦАП с параллельно включенными резисторами (рис. 10.14) для натурального двоичного кода

$$G_{\text{вых}} = g_0 \sum_{i=0}^{n-1} a_i \, 2^i, \qquad (10.17)$$

где g_0 — проводимость преобразователя, соответствующая шагу квантования и равная значению проводимости для кодовой комбинации 2^0. Ключи обозначаются контактной парой независимо от их исполнения.

Параллельное включение резисторов реализуется более просто с бесконтактными ключами, например, в схеме с общим эмиттером для транзисторов и интегральных микросхем, поэтому такое включение получило большее применение. Из-за трудностей создания идеальных источников напряжения и тока применяются преобразователи цифра — напряжение с суммированием токов отдельных секций на выходном резисторе $R_{вых}$ (рис. 10.15) при

$$R_i \gg R_{вых}, \tag{10.18}$$

где R_i — значение резистора i-й параллельной ветви.

Рис. 10.14. Схема преобразователя цифра — аналог (сопротивление) с параллельно включенными резисторами.

Весовые коэффициенты резисторов $a_0, a_1, ..., a_n$ в схеме на рис. 10.15, *а* пропорциональны проводимостям соответствующих разрядов при выполнении условия (10.18)

$$u_{вых} \approx E \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_{вых}}{R_i} a_i. \tag{10.19}$$

В схеме на рис. 10.15 *б* $R_м$ представляет собой так называемый масштабный потенциометр, применение которого позволяет обходиться без высокоомных резисторов в младших разрядах, т. е использовать в этих разрядах такого же порядка номинальные значения резисторов, как и в старшем разряде.

Для схемы на рис. 10.15

$$u_{вых} = E \sum_{i=0}^{n-1} \frac{R_{вых}}{R_i} b_i a_i, \tag{10.20}$$

где b_i — коэффициент передачи, вводимый в i-м разряде вспомогательным делителем $R_м$.

К стабильности резисторов и переходных сопротивлений ключей в преобразователях цифра — напряжение и цифра — ток предъявляются высокие требования. Из-за недостаточно большого отношения выходных сопротивлений закрытого и открытого электронного ключа и недостаточного

ых постоянства при высокой точности применяются контактные ключи (см. § 9.1). Так, для погрешностей ЦАП менее 0,1 % преобразователи в устройствах телеизмерений во многих случаях создаются с контактными ключами. Переключение резисторов при этом производится электромагнитными реле с герметизированными контактами или герконами (см. § 9.1).

Для получения высокоомных резисторов при небольших габаритах применяются измерительные резисторы пленочные или из микропровода, выпускаемые промышленностью в широкой номенклатуре. В качестве источника стабилизированного напряжения или тока в устройствах телеизмере-

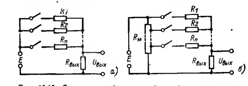


Рис. 10.15 Схемы преобразователей цифра — напряжение (ЦАП).

ния используются выпрямители, на выходе которых включены специальные измерительные стабилитроны.

Суммарная приведенная погрешность ЦАП δ_Σ состоит из:

$\delta_{кв}$ — погрешности квантования, зависящей от числа разрядов кода (см. гл. 3); путем выбора достаточного числа разрядов кода погрешность квантования $\delta_{кв}$ может быть получена достаточно малой;

δ_R—погрешности, обусловленной нестабильностью резисторов. Промышленность выпускает типовые измерительные резисторы и сетки резисторов с погрешностью $\delta_R = 0{,}01 \div \div 0{,}02$ %. При необходимости могут быть изготовлены специальные резисторы с еще меньшей погрешностью;

$\delta_{кл}$ — погрешности, обусловленной нестабильностью последовательных и шунтирующих составляющих сопротивления ключей и остаточными ЭДС на ключах (см. § 9.1). Для бесконтактных ключей погрешность $\delta_{кл}$, обусловленная их нестабильностью, в рассмотренных выше ЦАП имеет доминирующий характер, так как она может составлять примерно 0,5—1 % и более, если не принять специальных мер.

Для контактных ключей $\delta_{кл} = 0{,}01 \div 0{,}001$ %, но при значительно меньшем быстродействии и надежности;

$\delta_{с\,и}$ — погрешности, обусловленной нестабильностью источника питания ЦАП при постоянной его нагрузке. Промышленность выпускает измерительные стабилитроны с $\delta_{с\,и} = 0{,}01 \div 0{,}02$ %. Погрешность $\delta_{с\,и}$ при принятии специальных мер может быть уменьшена, однако во многих случаях минимальная погрешность электрических измерений определяется в основном $\delta_{с\,и}$;

$\delta_{н}$ — погрешности, обусловленной нестабильностью источника питания при изменении его нагрузки во время работы ЦАП.

Составляющая $\delta_{н}$ имеет большой удельный вес в рассмотренных выше ЦАП. Для схемы на рис. 10.15, *а*

$$\delta_{н} \approx R_{вых}/R_{н}.$$

Так, для $\delta_{н} = 0{,}1$ % $R_{н}$ в 1000 раз больше $R_{вых}$, что приводит к неэффективному использованию источника питания или очень высоким трудно реализуемым требованиям к стабилизации источника питания в схемах на рис. 10.13 и 10.14 при переключении резисторов.

Следует отметить, что $\delta_{н}$ относится к систематической погрешности, вызывающей нелинейность преобразования, и может быть учтена или скорректирована, например, с помощью вычислительного устройства или ЭВМ.

Перечисленные выше составляющие в первом приближении можно считать независимыми и суммарная погрешность ЦАП

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{кв}^2 + \delta_{R}^2 + \delta_{кл} + \delta_{с\,и}^2 + \delta_{н}^2}\,. \qquad (10.21)$$

Несколько меньшие требования к источникам питания при работе ЦАП предъявляются в схемах с потенциометрами (рис. 10.15, *б*) и еще меньше — в схемах с резисторными сетками, в которых сопротивление нагрузки источника питания может оставаться почти постоянным при переключении резисторов ЦАП. На рис. 10.16 для двоичного 7-разрядного натурального кода приведена широко применяемая сетка, получившая название сетки *R*2*R*. Ключ старшего разряда расположен справа, а младшего — слева. Для выбранной сетки выходное напряжение при переключении ключа старшего (правого) разряда изменяется на 1/2, при переключении соседнего ключа — на 1/4 и т. д.

Ток нагрузки стабилизированного источника питания U_0 при работе ЦАП и переключении ключей изменяется

значительно меньше, т. е. составляющая погрешности δ_R меньше. Такие сетки резисторов получили название точных делителей. Промышленность выпускает малогабаритные восьмиразрядные сетки резисторов $R2R$ для двоичного и двоично-десятичного кодов с погрешностью, вносимой резисторами, $\delta_R \approx 0{,}02$ %.

Применяются также ЦАП с сетками $R2R$ и более простыми ключами, например, для двоичного кода (рис. 10.17).

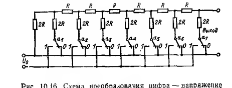


Рис. 10.16 Схема преобразования цифра — напряжение (ЦАП) с сеткой резисторов $R2R$.

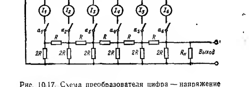


Рис. 10.17. Схема преобразователя цифра — напряжение (ЦАП) с сеткой резисторов $R2R$.

Здесь суммируются токи с одинаковых источников токов I_1, ..., I_n с бесконечными или достаточно большими внутренними сопротивлениями. Это необходимо для уменьшения взаимного влияния цепей. Старший разряд расположен справа.

Создание ЦАП с погрешностью примерно 0,2 % и менее на основе описанных выше бесконтактных ключей и сеток резисторов связано с рядом трудностей. По-видимому, будет более перспективно применение бесконтактных ключей на основе операционных усилителей на интегральных микросхемах и оптронах (см. § 4.4). В настоящее время наи-

более высокоточными являются бесконтактные время-импульсные ЦАП, позволяющие получить $\delta_\Sigma < 0,1\%$.

Время-импульсные ЦАП они называются по принципу их действия аналогично время-импульсным ЦАП, однако в них процессы протекают в обратной последовательности.

Структурная схема время-импульсного ЦАП приведена на рис. 10.18. Цифровой код преобразуется в преобразователе кодов *ПК*, например, в число-импульсный код (см. § 9.3). Затем число-импульсный код преобразуется в аналоговый широтно-импульсный сигнал в преобразователе *ЧИК—А*. Фильтр низких частот *ФНЧ* включается для подавления высокочастотных составляющих видеоимпульсов. Процессы здесь аналогичны процессам во время-импульсном АЦП, но протекают в обратной последовательности. Известно несколько способов их реализации. Как видно из структурной схемы, в таком ЦАП нет сетки резисторов с ключами, что является существенным преимуществом. Однако стабилизированный источник питания необходим. К недостатку таких ЦАП относится повышенное требование к фильтру низких частот из-за пульсирующего характера выходного тока, но это существенно при высоком требовании к быстродействию.

Цифровой код → ПК → ЧИК-А → ФНЧ → Аналог

Рис. 10.18. Структурная схема время-импульсного ЦАП.

Число компонентов (диодов) в преобразователе кодов ПК резко сокращается, если цифровой код преобразовать, например, в единично-десятичный и включать после каждого десятичного разряда делитель напряжений или токов в 10 раз. Такие схемы оказались более эффективными.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

11.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ИНЖЕНЕРНОЙ ПСИХОЛОГИИ

Функционирование сложных АИС невозможно без включения человека-оператора в контур системы. Из этого вытекает необходимость разработки методов и технических средств отображения информации в форме, удобной для эффективного восприятия ее человеком, тем более что пропускная способность человека на несколько десятичных по-

рядков меньше пропускной способности информационных систем, т. е. человек-оператор является звеном, ограничивающим информационные потоки.

Эффективность измерения, управления и контроля в значительной степени зависит от условий работы человека-оператора, которые определяются оснащенностью пункта управления необходимой аппаратурой и применяемыми методами отображения информации. Все это должно создавать психофизиологический комфорт для деятельности человека-оператора. Отображение информации относится к завершающим информационным процессам, которые заключаются в представлении информации на табло, пультах управления, мнемосхемах, дисплеях и других средствах отображения.

Вопросы отображения информации разделяются на две большие группы:

1) отображение элементов информации, представляемых в виде отдельных символов и знаков;

2) отображение на информационных моделях объектов контроля и управления, состоящих из элементов информации, образующих технологические и другие схемы, или из специальных устройств, таких, как дисплеи.

В соответствии с рекомендациями инженерной психологии отображаемая информация должна быть разбита на группы по степени ее важности. Наиболее важная информация, например, об аварийных режимах должна отображаться на переднем плане. Рациональная форма пульта управления близка к полукруглой с оптимальным углом обзора объектов сложной конфигурации 30—40 °С, при этом допустимый угол обзора в горизонтальной плоскости до 90°, а в вертикальной — 70° (вверх от линии взора 0—30° и вниз 0—40°).

Контуры изображений, несущих информацию, должны быть контрастными по яркости. Воспринимаемая человеком информация должна быть в эффективно воспринимаемой форме с минимальными требованиями к перекодированию, пересчету и интерполяции данных человеком. Исходя из этого, например, цифровое воспроизведение информации во многих случаях лучше аналогового (стрелочного), требующего мыслительных операций определения положения стрелки на шкале прибора и интерполяции данных.

Ниже приведены результаты независимого опознания каждой градации в зависимости от способа отображения знаков (символов) [55].

Способ отображения	Максимальное число градаций
Цветом	3—10
Размером	3
Шириной линий	2—3
Числом знаков	4
Частотой мигания	2—4
Яркостью	2—4
Длиной линии	2—4
Буквенно-цифровыми знаками	50

Различают три основные группы символов (знаков): геометрические, физические и буквенно-цифровые.

Геометрические символы выражают значение длиной или шириной отрезка линии, расстоянием между двумя точками или углом.

Физические символы отображают значения параметров физическим состоянием вещества. Для этого используется интенсивность свечения люминесцентного (люминография) или другого вещества, цвет окраски поверхности (колография) и др.

Буквенно-цифровые символы отображают цифры, буквы и условные знаки, соответствующие, например, определенной системе счисления или алфавиту.

Отображение информации буквенно-цифровыми знаками получило широкое применение из-за удобства восприятия их человеком. Во многих случаях целесообразно вводить дополнительные специальные условные знаки, близкие по их геометрическому изображению. Так, в системах информационного сопровождения применяют изображение самолета и автомобиля в виде схематического изображения самолета и автомобиля, а не слов «самолет» и «автомобиль». Эффективность и скорость восприятия при этом возрастают.

Информационная пропускная способность человека составляет в среднем 0,6—0,8 бит/с и может значительно изменяться в зависимости от индивидуальной особенности человека. Кроме того, кратковременная пропускная способность человека возрастает во много раз и достигает 20—50 бит/с.

Максимальная пропускная способность у человека наблюдается по зрительному каналу. Слуховой, тактильный, вкусовой, обонятельный и другие каналы имеют существенно меньшую пропускную способность. На рис. 11.1 приведены спектральные характеристики зрительного канала $E_\infty/E_\lambda = \varphi(\lambda)$, где E_∞ — чувствительность канала, λ — дли-

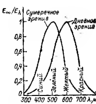


Рис. 11.1. Спектральные характеристики зрительного канала человека днем и в сумерки

на волны. В соответствии с этим для буквенио-цифровой информации, передающей точные количественные характеристики, рекомендуется применять желтый, желто-зеленый и белый цвета.

Минимальное время восприятия информации человеком, включающее в себя процессы «возбуждение — ответное действие» и называемое латентным периодом сенсомоторной реакции, зависит от анализатора человека, на который воздействует сигнал раздражителя, и от формы представления сигнала. Ниже дан латентный период с момента возбуждения нервиой системы до реакции.

Форма представления сообщения	Латентный период, с
Предмет в натуре	0,4
Цветной рисунок предмета	0,9
Светотеневой рисунок предмета (одноцветный)	1,2
Контурный рисунок	2,5
Слово	2,8
Таблица чисел, характеризующих предмет	4,5

Латентный период реакций выбора возрастает с увеличением количества восприинмаемой информации. Для определения задержки сигнала в человеке как звене системы τ, с, используют эмпирическую формулу

$$\tau = 0{,}03I,$$

где I — количество информации, предъявляемой оператору, бит

Количество информации, предъявляемой оператору, можно рассматривать как меру разнообразия. Тогда процесс восприятия информации упрощенио можно представить в виде процесса «перекодирования», представленного на рис. 11.2. Здесь из сигнальной информации образуется синтаксическая информация в виде смысловых объединений знаков в слове. Затем из синтаксической информации образуется семантнческая в виде смысловых объединений слов, образующих сообщения. И как заверша-

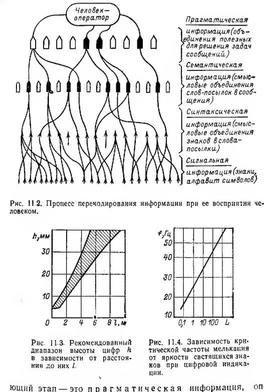


Рис. 11.2. Процесс перекодирования информации при ее восприятии человеком.

Рис. 11.3. Рекомендованный диапазон высоты цифр h в зависимости от расстояния до них l.

Рис. 11.4. Зависимость критической частоты мелькания от яркости светящихся знаков при цифровой индикации.

ющий этап — это прагматическая информация, определяющая полезность информации и представляющая собой объединения сообщений, полезных для решения задачи.

На рис. 11.3 приведен рекомендованный диапазон высоты цифр (или букв) h при различном расстоянии l до них, а на рис. 11.4 — зависимость критической частоты мелькания f от яркости светящихся знаков L при цифровой индикации.

11.2. ОТОБРАЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИИ

Промышленность выпускает разнообразные элементы отображения информации в виде буквенно-цифровых и мнемонических индикаторов. Последние представляют собой элементы, у которых светящееся изображение выполнено в виде символов, специальных знаков, геометрических

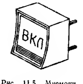


Рис. 11.5. Мнемонический знаковый индикатор.

Рис. 11.6. Мнемонический знаковый индикатор.

фигур и т. п. Мнемонические знаковые индикаторы (рис. 11.5, 11.6) используются для построения информационных моделей объектов контроля и управления, получивших название мнемосхем, которые широко применяются в энергосистемах, на химических заводах и т. д.

Цифровые индикаторы применяются для отображения измеряемой величины, индикации многопозиционных команд управления или результатов обработки информации в цифровой десятичной форме, удобной для восприятия человеком. В цифровой технике применяют индикаторы, основанные на различных принципах действия, число которых продолжает возрастать.

Так, используются цифровые **индикаторы проекционного типа** и индикаторы с подсветкой в торец светопровода. Индикатор проекционного типа имеет десять цифр (от 0 до 9), обычно нанесенных на десять линз, закрепленных в общей обойме, и десять лампочек, свет кото-

рых в виде силуэта цифры проектируется на матовом экране. Применяются цифровые индикаторы с изображением цифр от 0 до 9 путем выбора комбинаций газосветных или накальных ламп. Мозаичные индикаторы имеют большие габариты и потребляют значительную мощность. В последнее время срок службы индикаторных лампочек возрос до 7—8 тыс. ч, а миниатюрных неоновых — до 25 тыс. ч.

Принцип действия электролюминесцентных индикаторов основан на свечении твердого вещества в переменном электрическом поле звуковой частоты. Семисегментный индикатор представляет собой электрический конденсатор с одной пластиной в виде прозрачного проводящего слоя, например двуокиси олова или окиси кадмия, нанесенного на стекле. На этот слой наносится слой электролюминофора, замешанного в процессе производства на диэлектрике для получения изоляционного слоя. Второй пластиной конденсатора служит непрозрачная металлическая, например медная, пленка, нанесенная на электролюминофор. Пленка служит также отражателем света.

Электролюминесцентные индикаторы экономичны, потребляют небольшую мощность и могут включаться на выходе маломощных транзисторов. Их конструкция компактна и технологична. К недостаткам таких индикаторов относятся необходимость дополнительного источника переменного тока с частотой порядка сотен или нескольких тысяч герц, сравнительно высокое рабочее напряжение (220—250 В) и ограниченный срок службы (примерно 5 тыс. ч). Поэтому напряжение на люминофор подается обычно только на сравнительно короткое время индикации.

Широко применяются специальные газоразрядные цифровые лампы, обладающие памятью, с десятью электродами по форме цифр от 0 до 9. Такие лампы не требуют специальных запоминающих устройств, имеют сравнительно небольшую стоимость и малую инерционность. К недостаткам относится сравнительно высокое управляющее напряжение (около 200 В).

Современная электроника создала элементы индикации, совместимые по электрическим характеристикам с выходом низковольтных маломощных транзисторов и интегральных микросхем. К ним относятся в первую очередь светоизлучающие диоды (светодиоды) и жидкие кристаллы.

Светодиоды излучают свет в видимой части спектра и являются эффективными по КПД преобразователями. К достоинствам светодиодов относятся:

различные цвета свечения (желтый, зеленый, красный);

низкие рабочие напряжения (от одного до нескольких вольт) и малая потребляемая мощность;

долговечность (10^6 ч) при высокой надежности и ударной и вибрационной стойкости;

широкий рабочий диапазон температур окружающей среды;

компактность.

Эти качества позволяют совмещать светодиоды по электрическим, конструктивным и эксплуатационным характеристикам с интегральными микросхемами.

Свет в светодиодах генерируется вблизи поверхности *p-n*-перехода и распространяется во всех направлениях. Механизм электролюминесценции *p-n*-перехода, включенного в светодиоде в прямом направлении, существенно отличен. При прямом смещении потенциальный барьер *p-n*-перехода понижается и происходит инжекция электронов в *p*-область, а дырок — в *n*-область.

Энергия при рекомбинации неосновных носителей в *p-n*-переходе выделяется в виде фотонов, а частота светового излучения пропорциональна ширине запрещенной зоны полупроводникового материала. Так, если ширина запрещенной зоны более 1,8 В, то длина волны излучения менее 700 нм, т. е. излучение видимое. В табл. 11.1 приведены основные эксплуатационные характеристики некоторых светодиодов, работающих в диапазоне температур от

Тип светодиода	Цвет свечения	Яркость, Кд/мм²	Размер светового изображения, мм	Число сегментов	Габариты, мм
АЛ102А	Красный	5	3	1	⌀ 5 Н3
АЛ102Б	»	40	3	1	⌀ 5 Н3
АЛ103Б	»	1	—	7	⌀ 1,5 Н2, 5
АЛ304А	»	350	2×3	8	6,3×5,3×2
АЛ304В	Зеленый	60	2×3	8	6,3×5,3×2
КЛ101Б	Желтый	20	2	1	2,1×2,1
КЛ114	»	30	1,2×2	7	2,5×4×1,5

—60 до +70 °С (за исключением двух последних, работающих при температурах —10÷+70 °С). Масса светодиодов около 0,25 г.

В табл. 11.1 приведены также характеристики 8-сегментных индикаторов, обладающих некоторыми преимуществами по сравнению с 7-сегментными (рис. 11.7). В 8-сегментных индикаторах при пропадании свечения любого сегмента остается знак, не входящий в алфавит отображаемых символов, что облегчает борьбу с помехами.

Кроме того, при переходе на 8-сегментный индикатор в 1,4—2 раза возрастает число однозначно воспринимаемых разновидностей цифр и букв русского алфавита (до 23) по сравнению с 7-сегментным. В последние годы промышленность освоила выпуск также 8-сегментных индикатороа на основе люминофоров.

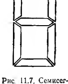


Рис. 11.7. Семисегментный цифровой индикатор.

Отметим, что к недостаткам светодиодов следует отнести трудности получения индикаторов увеличенных габаритов и пока еще относительно высокую стоимость светодиодов.

Элементы отображения на жидких кристаллах в настоящее время относятся к наиболее перспективным и, по-видимому, несколько потеснят другие индикаторы. Их принципиальное отличие от всех других заключается в том, что они относятся к индикаторам цвета, а не света и работают практически при любой освещенности помещения,

Таблица 11.1

Прямое падение напряжения, В, не более	Предельно допустимые значения		Исходный полупроводниковый материал
	Прямой ток, мА	Выброс обратного напряжения, В	
3,2	5	6	Фосфид галлия
4,5	20	6	То же
1,6	50	2	Карбид кремния
2	5,5	—	Фосфид галлия
3	11	—	То же
5,5	40	—	Карбид кремния
2,3—4	5	—	То же

даже прямыми лучами солнца. В отличие от этого индикаторы света работают при освещенности не выше заданной. Индикаторы на жидких кристаллах также относятся к самым экономичным по потреблению электроэнергии и применяются, например, в наручных кварцевых часах для цифровой индикации.

Принцип действия индикаторов основан на свойстве жидких кристаллов изменять преломление падающего или проходящего света (другие индикаторы основаны на свойствах излучения света). Некоторые вещества в жидкокристаллическом состоянии при определенном температурном режиме имеют одновременно физические свойства жидкости (текучесть, каплеобразование) и обладают свойствами правильной молекулярной структуры кристаллов, т. е. имеют правильную геометрическую структуру решетки молекулы. Следовательно, они обладают текучестью жидкости и оптическими свойствами кристаллов.

Из-за своей подвижности жидкие кристаллы легко изменяют свойства под воздействием электрического, магнитного и других полей. Для изменения свойств жидких кристаллов обычно используется управляющее электрическое поле. Индикатор на жидких кристаллах подобен электрическому конденсатору с двумя стеклянными пластинами, внутренние поверхности которых покрыты электропроводящим слоем (электродами), а между ними находится слой жидких кристаллов толщиной 10—20 мкм. Каждая цифра индикатора обычно состоит из 7—8 отдельных сегментов, включаемых на выходе коммутационных схем на транзисторах или микросхемах.

К недостаткам индикаторов на жидких кристаллах относятся относительно большое время включения и выключения (20—90 мс и 5—200 мс соответственно), а также ограниченный диапазон рабочих температур.

11.3. ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ НА МОДЕЛЯХ

С увеличением информационной емкости систем возрастала и информационная емкость средств отображения информации, а это потребовало совершенствования и изменения методов и средств выдачи информации человеку-оператору. Характерны следующие этапы развития средств отображения информации.

1. Представление информации на не связанных между собой индикаторах (сигнальных лампах, стрелочных при-

боров и др.) при сравнительно небольших потоках отображаемой информации.

2. Представление информации человеку-оператору на единой мнемосхеме технологического или другого контролируемого или управляемого процесса в энергосистеме, на химическом заводе, нефтебазе, транспорте и т. д.

Мнемосхема представляет собой упрощенную технологическую схему энергетического, химического или другого процесса, в отдельных точках которого устанавливаются соответствующие переключатели или индикаторы, показывающие значения параметров процесса или факт протекания процесса (например, включено или выключено). Так построены мнемосхемы электроподстанций, представляющие собой схему сетей с трансформаторами, выключателями, вольтметрами и т. п.

3. Комплексное представление информации на упрощенных информационных моделях (мнемосхемах) с возможностью выборочного, более подробного отображения информации об отдельных участках контролируемого процесса на дисплее или специальных табло, которые представляют собой обобщенную информационную модель выбираемого участка.

4. Иерархическое представление информации нескольким операторам с соответствующей их подчиненностью старшему оператору. Каждому оператору при этом выделяется определенный участок контролируемого процесса или объекта (например, при информационном сопровождении самолетов).

Естественно, что переход от одного этапа к другому вызывался увеличением потоков отображаемой информации, поэтому рассмотрим подробнее последние три этапа. Как отмечалось ранее, для технических комплексов на диспетчерском пункте или пункте управления обычно устанавливается щит с мнемосхемой, представляющий собой модель объектов контроля и управления. Однако для крупных комплексов достаточно полные модели объектов становятся громоздкими и трудновоспринимаемыми человеком-оператором.

Отображение информации на единой мнемосхеме (второй этап) широко применяется на диспетчерских щитах в энергосистемах. Такие щиты представляют собой панели с нанесенными на них условными символами выключателей, разъединителей, генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, сборных шин, образующих технологиче-

скую схему (модель) энергосистемы или ее части [44]. Применяются два типа диспетчерских щитов: световой (светлый) — главным образом на крупных диспетчерских пунктах и темный — на районных диспетчерских пунктах и менее крупных.

Световой щит имеет светящиеся символы (сигнальные лампочки). Так, символ выключателя мощности освещается красным или зеленым светом в зависимости от положения выключателя. Работающие генераторы, а в ряде случаев и линии электропередачи под напряжением также освещаются на модели световыми сигналами. Если контролируемый объект изменил свое положение (или состояние), то он освещается прерывистым (мигающим) светом с целью привлечения внимания диспетчера.

С помощью операции, называемой *квитированием*, диспетчер прекращает мигание символа, и лампа, освещающая символ, загорается ровным светом. Следовательно, на световом щите положение объектов определяется световыми сигналами. По желанию диспетчера световой щит может быть погашен, однако при возникновении нового сигнала он автоматически освещается и возникает звуковой сигнал.

На темном щите состояние коммутационной аппаратуры отображается одним из двух четко различимых положений. Символы выключателей имеют встроенную сигнальную лампу, которая загорается мигающим светом при несоответствии положения символа положению выключателя с целью привлечения внимания диспетчера. С помощью операции квитирования, так же как и на световом щите, прекращается мигание символа. Щит называется темным, так как в нормальном состоянии лампы несоответствия не горят и на щите нет других световых символов.

Вследствие ограниченной информационной пропускной способности человека для крупных и сложных технических комплексов приходится отходить от мнемосхемы с технологической моделью объектов и в большей степени учитывать возможности человека. В таких условиях становятся эффективными мнемосхемы, построенные на основе следующих принципов:

1) ответственности, заключающейся в сосредоточении наиболее важной информации в центре мнемосхемы;

2) последовательности — построении мнемосхемы в порядке использования информации оператором;

3) концентрации внимания оператора на информации,

наиболее часто используемой и требующей постоянного контроля.

Отход от принципов прямого моделирования объектов контроля и управления на мнемосхемах в сложных комплексах приводит к резкому сокращению габаритов диспетчерских щитов и пультов, а также к сокращению или ликвидации изображения технологических связей на мнемосхеме. Например, на центральных диспетчерских пунктах магистральных трубопроводов оказалось целесообразным положить в основу следующие принципы построения:

1) разделение потока информации по частоте использования;

2) представление информации на двух отдельных моделях: трубопровода в целом и обобщенных контролируемых пунктов (например, насосных станций).

Одним из наиболее эффективных способов отображения является представление информации на дисплее, отличающееся наглядностью, компактностью и достаточной полнотой данных. Однако это существенно усложняет средства отображения, требует ЭВМ и специального банка данных и программ, поэтому дисплеи применяются в более сложных и ответственных системах, хотя существует тенденция резкого расширения областей их применения. Кроме того, еще существует определенный консерватизм, связанный с простотой и наглядностью традиционных информационных моделей в виде мнемосхем. Переход к микропроцессорам и микро-ЭВМ расширит области применения дисплеев.

Рассмотренные этапы развития методов и средств отображения информации даны в упрощенном виде. Реальные устройства намного сложнее, и поэтому почти всегда существует взаимное проникновение и совмещение одновременно двух или трех этапов развития из указанных.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ПРИНЦИПЫ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ

12.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯХ

Измерение — это нахождение физического, биологического, химического или другого значения величины опытным путем с помощью специальных технических средств. В результате измерения получается отношение значения

измеряемой величины к значению, принятому за единицу сравнения, называемому единицей измерения.

Для измерения характерно получение количественной информации об измеряемой величине, которая называется **измерительной информацией**.

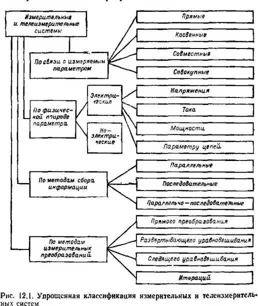


Рис. 12.1. Упрощенная классификация измерительных и телеизмерительных систем

В связи с резким расширением потребностей в измерениях в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и для научных исследований возникла необходимость разгрузить и освободить человека от трудоемких, рутинных операций получения и обработки измерительной ин-

формации. Эти операции автоматического отбора, сбора, обработки, передачи, хранения, отображения и записи измерительной информации выполняют измерительные и телеизмерительные системы.

Процессы измерений и телеизмерений связаны с началом развития многих наук. Так, выдающийся русский ученый Д. И. Менделеев говорил: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немыслима без меры»

Современное развитие большинства областей науки невозможно без измерительных систем. Современные открытия и экспериментальные исследования требуют большого количества измерительной информации, которое невозможно получить и обработать ручными методами, а во многих случаях измерительные операции и недоступны непосредственно человеку (океан, космос, геофизика, металлургия, химия, ядерная физика и т. д.).

Очень большое разнообразие измерительных и телеизмерительных систем можно увидеть, например, из их упрощенной классификации (рис. 12.1). Здесь используются только четыре классификационных признака: связь с измеряемым параметром, физическая природа параметра, методы сбора информации и методы измерительных преобразований. Число различных измеряемых параметров неэлектрических величин превышает тысячу.

Характер измерений, рассматриваемый по связи с параметром, изменяется также в широких пределах от прямых до совокупных измерений, при которых одновременно производится измерение нескольких одноименных величин и искомое значение находится в результате решения системы уравнений, получаемых при прямых измерениях, и определенных сочетаний этих величин. Примером совокупных измерений может быть определение массы отдельных гирь по известной массе одной из них и по результатам прямых измерений масс определенных сочетаний гирь.

При косвенных измерениях значения искомых величин находят из известных зависимостей φ между величинами Y и x_i, определяемыми из прямых измерений:

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

К косвенным измерениям относится определение КПД устройства по результатам измерения потребляемой и отдаваемой мощности.

Совместные измерения отличаются тем, что при этом измеряется несколько величин для нахождения зависимостей между ними. Так, в результате совместных измерений определяют температурные коэффициенты *R*, *L* и *C* по данным их прямых измерений при нескольких температурах. К совместным измерениям относят также определение статистических оценок по данным прямых измерений.

Существенное различие в структуре информационных систем имеет место при различных методах сбора информации. Наименьшие затраты на аппаратуру могут быть реализованы при последовательном во времени сборе информации с помощью коммутатора (распределителя) и общей для всех каналов аппаратуре обработки информации. Однако при этом в *K* раз возрастает суммарное время обработки информации, где *K* — число каналов измерений, принятых одинаковыми.

В связи с этим последовательный сбор информации применяется там, где ограничения по быстродействию допустимы.

В отличие от этого для параллельного сбора информации характерно наибольшее быстродействие всех каналов, которое достигается ценой усложнения аппаратуры сбора, обработки и отображения информации, индивидуальной для каждого измерительного канала. Параллельно-последовательный сбор информации применяется в компромиссных ситуациях, а также если допустимо различное быстродействие для каналов измерений.

Телеизмерение как область техники и технических наук одновременно является частью измерительной техники и телемеханики. В связи с этим в ТИ развиваются и применяются одновременно методы и технические средства измерений и телемеханики. Телеизмерение определяется как область автоматических измерений на расстоянии через каналы связи (без непосредственного участия человека в процессе ТИ).

Соответственно *системой телеизмерения называется совокупность телеизмерительных устройств на передающей и приемной сторонах и канала связи для автоматического измерения одного или ряда параметров на расстоянии.*

В телеизмерении как области измерений, применяются многие методы и технические средства, характерные для автоматических измерений.

1. Первичный отбор информации всегда осуществляется первичными преобразователями, автоматически преобразующими измеряемые параметры в один из унифицированных параметров (напряжение, ток, сопротивление и др.).

2. Широко применяются различные методы уменьшения погрешностей и отображения измеряемого параметра в виде, удобном для восприятия человеком, регистрации и ввода в ЭВМ. К этим методам относятся методы сравнения с мерой, масштабирования, линеаризации шкалы и др.

3. Преобразователи, используемые в процессе телеизмерения, должны иметь стабильный коэффициент передачи, т. е. небольшую, обычно нормированную погрешность.

Методы автоматических измерений развиваются с учетом специфики телемеханики.

1. Уменьшение влияния канала связи с изменяющимся затуханием и сравнительно высоким уровнем помех на погрешность телеизмерений. С этой целью в передающем устройстве осуществляется согласование сигнала, получаемого с первичного преобразователя, с каналом связи путем кодирования и модуляции. Кодирование позволяет повысить помехоустойчивость и применить эффективные методы разделения сигналов. Выбор метода и параметров модуляции позволяет согласовать сигнал с каналом связи по частоте и повысить помехоустойчивость. В приемном устройстве производятся обратные преобразования, т. е. согласование сигнала, получаемого из канала связи, с сигналом, подаваемым на устройства отображения.

2. Из экономических соображений, вызванных тем, что стоимость канала связи во многих случаях значительно превышает стоимость оконечных устройств телеизмерений, один канал используется для передачи многих телеизмерений или для одновременной передачи ТИ и других сигналов телемеханики (ТУ, ТС и др.). Другими словами, из экономических соображений применяются многоканальные передачи сигналов телемеханики.

В дальнейшем чаще будем применять понятие телеизмерительные устройства. Эти устройства вместе с каналом связи образуют систему телеизмерений.

Телеизмерительные устройства — это автоматические измерительные приборы, предназначенные для измерения на расстоянии путем ряда автоматических преобразований и передачи сигналов через канал связи. Процесс телеизмерения производится без непосредственного участия человека, при этом процесс вос-

приятия информации человеком не рассматривается. При проектировании телеизмерительных устройств особое внимание обращается на уменьшение погрешностей измерений из-за изменения затухания сигнала и наличия помех в канале связи, вызываемых изменением климатических или каких-либо других условий.

Устройства телеизмерений принято называть по методу передачи сигналов через канал связи, т. е. по способу модуляции и кодирования, которыми передается значение измеряемого параметра. Если при модуляции синусоидального колебания

$$\varphi(t) = A \sin(\omega t + \psi) \tag{12.1}$$

измеряемая величина модулирует амплитуду A, частоту ω или фазу ψ, то устройства соответственно называются устройствами телеизмерений с амплитудной (АМ), частотной (ЧМ) или фазовой (ФМ) модуляцией или просто амплитудными, частотными или фазовыми устройствами ТИ. Устройства с амплитудной модуляцией постоянного тока (как переносчика информации) называют *устройствами интенсивности*.

При выборе способа модуляции больше возможностей, если использовать импульсный ток как переносчик информации. Так, возможны и применяются устройства с амплитудно-импульсной (АИМ), фазо-импульсной (ФИМ), время-импульсной (ВИМ), широтно-импульсной (ШИМ) и кодо-импульсной (КИМ) модуляцией.

Выбор способа модуляции в системе телеизмерения существенно зависит от возможных изменений параметров канала связи. При использовании коротких проводных линий (воздушных — до 3—7 км, кабельных — до 20 км) еще используются системы интенсивности, аппаратурно наиболее простые. Погрешность передачи в таких системах, однако, в сильной степени зависит от непостоянства таких параметров линий связи, как ее последовательное сопротивление и сопротивление утечки.

Последовательное сопротивление линии $R_л$ может изменяться в широких пределах в зависимости от температуры окружающей среды и от других внешних факторов. Например, изменение температуры от −40 до +40 °С вызывает изменение сопротивления стальных проводов воздушной линии на 37 %. Такие изменения $R_л$ приводят к существенным погрешностям при передаче сигналов. В реальных условиях во время дождя, гололеда и т. п. из-за

несовершенства изоляции сильно изменяется и утечка линии.

Несколько меньше линии связи влияют в балансных системах измерений, в которых для уменьшения дополнительных погрешностей применяются схемы с обратными связями. Балансные системы и устройства для прямого измерения тока или напряжения относятся к группе устройств интенсивности с амплитудной модуляцией постоянного тока, которые требуют физической выделенной линии связи для пропускания постоянной составляющей тока и не допускают больших изменений затухания линии, поэтому они не применяются в системах с радиолиниями, проводными линиями значительной протяженности и уплотненными каналами связи.

Изменение затухания канала связи приводит к изменению уровня принимаемого сигнала, а следовательно, вызывает погрешность телеизмерений в системах интенсивности. Поэтому отказ от системы интенсивности (называемой также системой ближнего действия) позволяет резко уменьшить влияние затухания канала связи на погрешность телеизмерений. Так, в системах с частотными и импульсными методами модуляции с изменением амплитуды сигнала частота сигнала и такие параметры, как длительность импульса или его задержка, в известных пределах не изменяются. Вследствие этого и **погрешность телеизмерений в широких пределах не зависит от уровня сигнала**.

В промышленной телемеханике применяются четыре группы устройств телеизмерений:

1) интенсивности с амплитудной модуляцией постоянного тока;

2) с частотной и частотно-импульсной модуляцией;

3) с широтно-импульсной и время-импульсной модуляцией;

4) с кодо-импульсной модуляцией.

На рис. 12.2 приведена структурная схема одноканального устройства телеизмерения. Здесь измеряемая физическая величина x_1 (давление, уровень, скорость и т. п.) преобразуется с помощью первичного преобразователя *ПП* в промежуточный, обычно унифицированный параметр z, которым может быть ток, напряжение, сопротивление и др. Величина z преобразуется в передатчике телеизмерений *Прд* методами кодирования и модуляции в параметр сигнала y_1, более пригодный для передач и по ЛС. Следовательно,

передатчик *Прд* согласует параметр z с линией (каналом) связи. На приемной стороне сигнал y_2 поступает на вход приемника *Прм* и преобразуется (демодулируется и декодируется) в величину, которой может быть, например, электрический ток I, измеряемый выходным прибором *ВП*. Приемник, таким образом, согласует принимаемый из канала связи сигнал с выходным прибором. Выходной прибор воспроизводит измеряемую величину x_2, которая при отсутствии искажений должна быть равна x_1.

x_1 → ПП → z → Прд → y_1 → Линия связи → y_2 → Прм → I → ВП → x_2

Рис. 12.2. Структурная схема одноканальной системы телеизмерения

Простейшее телеизмерительное устройство представляет собой цепочку последовательно включенных преобразователей с коэффициентами преобразования

$$k_1 = z/x_1 \text{ (ПП)};\quad k_2 = y_1/z \text{ (Прд)};\quad k_3 = I/y_2 \text{ (Прм)};\quad k_4 = x_2/I \text{ (ВП)}. \qquad (12.2)$$

Выходной сигнал связан с входным соотношением

$$x_2 = k_4 I = k_4 k_3 y_2 = k_4 k_3 k_2 k_1 k_к x_1, \qquad (12.3)$$

где x_2 — величина, воспроизводимая выходным прибором; $k_к = y_2/y_1$ — коэффициент передачи канала связи для данного (рабочего) вида модуляции.

В общем виде число преобразователей может быть равно n, тогда

$$x_2 = x_1 \prod_{i=1}^{n} k_i. \qquad (12.4)$$

Из (12.3) следует, что независимое изменение коэффициента передачи любого из преобразователей (k_1, k_2, k_3 и k_4) на δ_i, %, вызывает примерно такую же относительную погрешность телеизмерений. Все это обусловливает высокие требования к стабильности коэффициента передачи каждого преобразователя в отдельности ($\delta_i < 1$ %). Следует заметить, что в системах телефонной, телеграфной и другой связи изменение коэффициента передачи даже на 20—30 % обычно несущественно, т. е. нестабильность коэффи-

Таблица 12.1

Преобразование сигналов			
Общеинформационное	цифровое	общеизмерительное	математическое
Модуляция Демодуляция Преобразование параметров Усиление Аттенюация Трансформация Выпрямление Инвертирование Формирование Фильтрация Функциональные преобразования (нелинейные) Изменение спектра Отображение Запись Считывание	Квантование Аналог—цифра Цифра — аналог Перекодирование параллельного кода в последовательный и обратно Цифровое воспроизведение Цифровая запись	Сравнение с мерой Деление и умножение амплитуд, частот и других параметров Преобразование ординат Перемещение по координатам Воспроизведение и запись меток	Суммирование Вычитание Логарифмирование Дифференцирование Интегрирование и др.

циентов передачи порядка десятков процентов значения не имеет. В табл. 12.1 даны примеры измерительных преобразований.

Капитальные затраты на линию связи возрастают с увеличением расстояния, поэтому при протяженности линии связи более 0,3 — 1 км использование индивидуальной линии для каждого телеизмерения в большинстве случаев недопустимо из экономических соображений. При больших расстояниях экономически целесообразнее применять методы многоканальной передачи телеизмерений или передавать по общей линии также сигналы ТС и ТУ, что позволяет уплотнить линию связи и использовать ее для передачи нескольких сигналов.

Одноканальные и многоканальные системы телеизмерений, а также телеизмерительная часть многофункциональных систем телеконтроля и телеуправления состоят из первичных преобразователей телеизмерения, передающих устройств телеизмерения, каналов связи, приемных устройств телеизмерения и устройств отображения информации или устройств для ввода информации в управляющие машины.

Все устройства и системы телеизмерений разделяются на аналоговые и цифровые.

Система телеизмерений называется дискретной (или цифровой), если значения телеизмеряемого параметра из возможного множества оценивают числами. В тех случаях,

когда измеряемые значения параметра составляют бесконечное множество, сплошь заполняющее некоторый интервал, такое телеизмеряемое значение параметра называют непрерывным, а систему — аналоговой.

В большинстве случаев зависимость между значением телеизмеряемого параметра x_1 и индексом (глубиной) модуляции m в канале связи, с помощью которого передается этот параметр, линейная:

$$m = kx_1, \tag{12.5}$$

где k — постоянный коэффициент.

Рис. 12.3. Классификация систем телеизмерений по виду модуляции.

Во всех аналоговых системах квантование по измеряемому параметру (уровню) отсутствует, но может быть дискретизация во времени, как, например, во время-импульсных, широтно-импульсных и некоторых других устройствах ТИ. На рис. 12.3 приведена классификация систем ТИ по виду модуляции.

Все кодо-импульсные устройства используют дискретные, т. е. квантованные по уровню и дискретные во времени сигналы. В таких устройствах значение параметра всегда передается в виде комбинаций двоичного или другого кода.

Если для первых этапов развития систем телеизмерения было характерно большое разнообразие принципов построения аналоговых методов телеизмерения, то в дальнейшем произошел переход к цифровым методам. Такая тенденция вызвана преимуществами микроэлектронной элементной базы, применением цифровых машин, а также преимуществами цифровых методов передачи воспроизведения и цифровой записи. Аналоговые устройства телеиз-

мерений еще сохранились в тех случаях, когда число телеизмерений, передаваемых с одного пункта, невелико и необходимо иметь очень простую аппаратуру на контролируемом пункте.

Широкому применению цифровых систем телеизмерения способствуют возрастание потоков измерительной информации, и все большее внедрение унифицированных элементов, агрегатизация устройств и необходимость построения систем, работающих по типовым телеграфным и другим каналам связи. Так, в последние десятилетия уже не разрабатываются аналоговые системы ТИ. Несмотря на это, еще самой массовой системой ТИ является время-импульсная система с экспоненциальными преобразователями, описанная далее.

12.2. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ

В простейших одноканальных системах объектом телеизмерения может быть один из физических непрерывных параметров $L_i\ (t)$, например напряжение, мощность, давление, расход и т. п. В крупных и более сложных системах объектами телеизмерения являются параметры различного рода технических комплексов (энергосистем, трубопроводов, нефтепромыслов, ирригационных сооружений и др.).

На диспетчерском пункте (ДП) или пункте управления (ПУ) в таких комплексах необходимо отобразить совокупность процессов, которые характеризуются множеством одинаковых или различных параметров телеизмерения, сосредоточенных в одном или нескольких контролируемых пунктах.

Эти параметры целесообразно рассматривать как единую характеристику поведения контролируемого комплекса, которую запишем в виде матрицы-столбца

$$L(t) = \begin{Vmatrix} L_1(t) \\ \vdots \\ L_N(t) \end{Vmatrix}. \qquad (12.6)$$

Свойства $\underline{L}\ (t)$ описываются характеристиками отдельных случайных функций $L_i\ (t)$, где $i = 1, ..., N$, и матрицей взаимно-корреляционных функций для различных пар параметров.

Телеизмерение N параметров (12.6) производится с помощью соответствующих первичных преобразователей и

одной или нескольких многоканальных или одноквиальных систем телеизмерения. В промышленной телемеханике продолжается тенденция применения (там, где это возможно) типовых многоканальных систем телеизмерений с типовыми приемным и передающим устройствами, если объекты сосредоточены в одном пункте, и многими рассредоточенными передающими устройствами при рассредоточенных объектах телеизмерения. Выходным параметром первичных преобразователей в многоканальной системе является единый унифицированный параметр — в большинстве случаев постоянное напряжение или ток с нормированными пределами изменений и непрерывно изменяющейся (аналоговой) выходной величиной.

Первичные преобразователи преобразуют измеряемую величину в сигнал с малой инерционностью, которую во многих случаях можно не учитывать. К исключениям относятся, например, преобразователи компенсационного типа с большими постоянными времени в цепи обратной связи.

Как следует из сказанного, при одном унифицированном выходном параметре первичных преобразователей во многих случаях несущественно, какой первичный параметр измеряется, если требования к погрешности, помехоустойчивости, быстродействию, диапазону выходных сигналов и надежности одинаковы. В таких случаях преобразование в одинаковый выходной параметр означает, что требования к дальнейшим преобразованиям сигналов в передающем и приемном устройствах телеизмерений, а также к каналу связи одинаковы.

Различие будет только в отображении информации на приемной стороне, так как во всех устройствах телеизмерений (как основное требование) необходимо воспроизводить или регистрировать измеряемую величину в каждом канале телеизмерений в принятых для нее единицах измерения или в процентах от номинального значения, при этом должна обеспечиваться заданная точность телеизмерений. В простейших одноканальных аналоговых системах телеизмерений измеряемая величина отображается на стрелочном приборе, например, в принятых для нее единицах измерения или в процентах от номинального значения. В крупных технических комплексах, где необходимо иметь единую характеристику как результат телеизмерения N параметров, представляемых в виде (12.6), задача отображения информации значительно усложняется, что рассмотрено в гл. 11.

Независимо от названий телеизмеряемых параметров может существенно изменяться характер оперативных действий. Различают следующие виды телеизмерений:

непрерывное;

по вызову, осуществляемое путем посылки с ПУ на КП индивидуальных или циркулярных вызовов на подключение к каналу связи передатчиков или первичных преобразователей вызываемых параметров телеизмерений. Одновременно при этом подключаются к каналу связи и соответствующие приемные устройства на ПУ;

по выбору, при котором процесс телеизмерения осуществляется непрерывно или циклически, а подключение на ПУ выходных приборов, воспроизводящих телеизмеряемый параметр, производится по выбору.

Во всех рассмотренных случаях может производиться телеизмерение текущих значений параметров (ТИТ), характеризующих текущий режим работы и телеизмерения интегральных значений параметров (ТИИ), получаемых на передающей стороне путем интегрирования во времени.

12.3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Основной характеристикой устройств телеизмерений является погрешность, характеризующая отличие показаний воспроизводящего или записывающего прибора от действительного значения параметра, измеряемого образцовым прибором.

Погрешность устройства телеизмерений, так же как и в технике измерений, характеризуется **абсолютной** Δ, **относительной** $\delta_{от}$ и **приведенной** δ погрешностями:

$$\Delta = x_и - x_д; \quad \delta_{от} = \Delta \cdot 100/x_д; \; \delta = \Delta \cdot 100/(x_{max} - x_{min}), \quad (12.7)$$

где $x_д$ — действительное значение телеизмеряемой величины (измеряемое образцовым прибором); $x_и$ — измеренное значение — показание воспроизводящего или записывающего телеизмерительного прибора; x_{max}, x_{min} — предельные значения измеряемой величины (по шкале выходного прибора).

Можно выделить систематическую $\Delta_{си}$ и случайную $\Delta_{сл}$ погрешности, так что результирующая погрешность

$$\Delta = \Delta_{си} + \Delta_{сл}. \quad (12.8)$$

Систематическая погрешность вызывается стабильными причинами, например отклонением характеристики преобразования от линейной, которые можно учесть.

Случайная погрешность вызывается нестабильными факторами, которые нельзя предсказать, например влиянием шумов.

Погрешности Δ имеют две составляющие:

а) аддитивную, не зависящую от измеряемой величины;

б) мультипликативную, пропорциональную измеряемой величине.

Максимальное значение суммарной абсолютной погрешности

$$\Delta_{max} = \Delta_a + \delta_м x, \qquad (12.9)$$

где Δ_a — максимальное значение абсолютной аддитивной погрешности, не зависящей от измеряемой величины; $\delta_м$ — максимальное значение относительной мультипликативной погрешности, пропорциональной измеряемой величине x.

Все перечисленные погрешности могут иметь характер погрешностей одноразовых или статистических измерений. Для устранения влияния случайных показаний в телеизмерении, так же как и в измерительной технике, систему характеризуют величинами погрешностей, полученных в результате многих повторных измерений, т. е. усредненными статистическими показателями.

Систематическая составляющая погрешности при экспериментальном определении в точке x диапазона измерений

$$\Delta_{сн} = (\overline{\Delta}_м + \overline{\Delta}_б)/2, \qquad (12.10)$$

где $\overline{\Delta}_м = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_{мi}$ вычисляется, как среднее значение погрешности в точке x при медленном многократном изменении измеряемого параметра со стороны меньших значений до значения x; $\Delta_{мi}$ — i-я реализация погрешности при медленном изменении параметра со стороны меньших значений до значения x; $\overline{\Delta}_б = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_{бi}$ — вычисляется так же, как и $\overline{\Delta}_м$, но при изменении параметра со стороны больших значений до значения x.

При экспериментальном определении $\Delta_{сн}$ интервал времени, в течение которого производится $2n$ измерений $\Delta_{мi}$ и

$\Delta_{бi}$, не должен превышать времени одного измерения более чем в 100 раз.

Среднеквадратическое отклонение погрешности вычисляется по формуле

$$\delta_{ск} = \frac{1}{2n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta_{мi} - \overline{\Delta}_{мi})^2 - \sum_{i=1}^{n} (\Delta_{бi} - \overline{\Delta}_{бi})^2}. \qquad (12.11)$$

Результирующая погрешность телеизмерения равна сумме основной и всех дополнительных погрешностей. *Основной погрешностью называется погрешность, определяемая при нормальных условиях работы.* Это соответствует номинальным напряжению и частоте, отсутствию помех, работе при температуре окружающего воздуха 20±3 °C и относительной влажности 30—80 %, отсутствию влияния внешних магнитных или других полей, нехарактерных для нормальных условий, и т. п.

Основная погрешность зависит от принципа действия, конструкции и технологии изготовления телеизмерительного устройства (например, неточности градуировки, неопределенности нуля, в том числе из-за сухого трения в опорах, люфтов и т. п.).

Дополнительными погрешностями называются погрешности, вызванные отклонением от нормальных условий работы, т. е. изменением напряжения и частоты питающих напряжений, окружающей температуры, внешних полей, параметров канала связи, влиянием помех и т. д.

Устройства телеизмерений по точности измерений делятся на семь классов: 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5 и 4. Основная приведенная погрешность устройства ТИ в процентах от конечного значения рабочей части шкалы выходного прибора не должна превышать указанных (по абсолютному значению) значений классов точности. Так, для класса точности 1,0 основная приведенная погрешность $\delta \leqslant 1$ %.

Изменение показаний выходного прибора не должно превышать значения основной погрешности для данного класса при отклонении внешних условий на передающей и приемной сторонах в следующих пределах:

1) напряжения питания — на +10÷—15 % номинального значения;

2) частоты питающего напряжения — от 49 до 51 Гц;

3) уровня входного сигнала — в 2 раза в сторону увеличения и в сторону уменьшения от номинального значения (на системы интенсивности это не распространяется);

4) напряженности внешнего магнитного поля — на 400 А/м как постоянного, так и изменяющегося по синусоидальному закону с частотой питающего напряжения.

По температурным условиям устройства ТИ делятся на три группы: для производственных помещений, закрытых неотапливаемых помещений и для установки на открытом воздухе.

Устройства телеизмерений и, в первую очередь, передающее устройство работают часто в тяжелых климатических и эксплуатационных условиях, имеют большое число преобразователей, поэтому для них характерны сравнительно большие дополнительные погрешности, что обычно не имеет места для локальных измерительных устройств. При нормализации погрешностей согласно (12.9) задают отдельно основное и дополнительное значения аддитивной и мультипликативной составляющих.

Телеизмерительное устройство состоит из многих преобразователей, усилителей и других узлов, включенных последовательно и работающих в различных, во многих случаях не зависимых между собой условиях. Для независимых условий и последовательно включенных частей результирующая средняя квадратическая погрешность системы в соответствии с (12.11) равна

$$\delta_\Sigma \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \ldots + \delta_n^2}, \qquad (12.12)$$

где δ_i — значение средней квадратической погрешности i-го преобразователя или последовательно включенного блока. Результирующая погрешность преобразователей или узлов, включенных последовательно, для которых погрешности имеют между собой стопроцентную корреляцию, равна алгебраической сумме:

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \delta_i.$$

Из экспериментальных исследований в сложных системах телеизмерений и измерений в энергосетях следует, что результирующая суммарная погрешность незначительно отличается от геометрической суммы, определяемой по (12.12).

Для устройства телеизмерений в ряде случаев определяется только погрешность телепередачи, в которую не входят погрешность первичных преобразователей и по-

грешности воспроизводящих или записывающих приборов (например, при различных переключаемых датчиках и выходных приборах или при трансляции телеизмерений).

Одним из существенных источников погрешностей для многих устройств телеизмерений являются помехи в канале связи. Помехоустойчивость устройства телеизмерений оценивается по средней квадратической $\delta_{ск}$ и средней $\delta_{ср}$ погрешностям. Для непрерывных случайных величин они характеризуются интегральными выражениями

$$\delta_{ср} = \bar{\delta} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int\limits_{-T/2}^{-T/2} \delta(t)\,dt; \quad \delta_{ск} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int\limits_{-T/2}^{T/2} [\delta(t) - \delta_{ср}]^2\,dt, \tag{12.13}$$

где T — время наблюдения; $\delta(t)$ — мгновенное значение приведенной погрешности.

В ряде случаев определяется результирующая погрешность от помех:

$$\delta_{р}^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int\limits_{-T/2}^{T/2} \delta^2(t)\,dt = \delta_{ск}^2 + \delta_{ср}^2. \tag{12.14}$$

С р е д н я я   к в а д р а т и ч е с к а я погрешность характеризует степень рассеяния погрешностей вокруг своего среднего значения, в то время как с р е д н я я погрешность равна среднему отклонению показаний выходного прибора при наличии помех от показаний при их отсутствии. При слабых флуктуационных помехах преобладает средняя квадратическая погрешность, в то время как при сильных флуктуационных помехах может преобладать средняя погрешность.

К важнейшим характеристикам устройства телеизмерений относится в р е м я   у с т а н о в л е н и я   п о к а з а н и й ТИ, называемое также быстродействием и определяемое как интервал между моментом скачкообразного изменения телеизмеряемого параметра и моментом, начиная с которого показания воспроизводящего или записывающего прибора достигают нового значения с заданной погрешностью (обычно $\pm 2\,\%$ установившегося значения). Допустимое время установления в промышленных устройствах телеизмерения $T_{доп} = 3 \div 5$ с.

По времени установления показаний системы телеизмерений делятся на три группы: с временем установления

показаний до 1 с, от 1 до 4 с и более 4 с. Из-за переходных процессов во время установления показаний значение телеизмеряемой величины может отличаться от истинного значения. Погрешность, возникающая в этом случае, обусловлена наличием в тракте телеизмерений узкополосных фильтров, инерционных и интегрирующих звеньев, а в дискретных и кодовых устройствах — также временем прямого и обратного преобразований непрерывного сигнала в цифровой (в виде кодовых комбинаций), периодичностью отсчетов в циклических системах ТИ и временем передачи (см. определение быстродействия ТИ в § 8.4).

При квантовании возникает **погрешность квантования**, определяемая шагом квантования $\Delta x_{кв}$. При равномерном квантовании максимальное значение приведенной погрешности

$$\delta_{кв} \leqslant \Delta_{xкв}/2(x_{max} - x_{min}) = 1/2(q-1), \qquad (12.15)$$

где $x_{max} - x_{min}$ — диапазон измерения параметра; $(x_{max} - x_{min})/\Delta_{xкв} = (q-1)$ — число интервалов (шагов) квантования. Определение погрешности квантования рассмотрено в гл. 1.

В системах телеконтроля и телеуправления в ряде случаев возникает задача суммирования измеряемых величин на передающей или приемной стороне. Суммирование необходимо, например, при телеизмерении суммарной мощности пространственно рассредоточенных электростанций или потребителей электроэнергии, суммарного расхода воды, нефти, газа и т. п.

Для уменьшения числа телеизмеряемых параметров суммирование целесообразнее выполнять на передающей стороне. Однако это удается осуществить только на крупных сосредоточенных пунктах. При рассредоточенных пунктах суммирование телеизмеряемых величин производится на приемной стороне.

В процессе суммирования измеряемые величины $A_1, A_2, ..., A_n$ преобразуются в соответствующие вспомогательные величины $x_1, x_2, ..., x_n$, так что

$$x_1 = \varphi_1(A_1); \quad x_1 = \varphi_2(A_2), \ldots; \quad x_n = \varphi_n(A_n). \quad (12.16)$$

Для суммирования необходимо выполнить условие

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = k \sum_{i=1}^{n} A_1. \qquad (12.17)$$

Это условие выполняется, если зависимость между x и A линейная:

$$x_i = \varphi_i (A_i) = K_i A_i, \qquad (12.18)$$

где K_i — постоянный коэффициент, при этом все коэффициенты равны между собой, т. е.

$$K_1 = K_2 = ... = K_n = K. \qquad (12.19)$$

Коэффициент K называется постоянной суммирования. Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} K (A_1 + A_2 + ... + A_n) = K \sum_{i=1}^{n} A_i. \quad (12.20)$$

Для суммирования наиболее часто используются такие вспомогательные величины, как электрический ток или напряжение и число импульсов. При суммировании токов преимущественно используется постоянный ток, а при суммировании напряжений — напряжение переменного тока. Такое суммирование не вызывает ограничений по числу слагаемых суммы и реализуется наиболее просто. Суммирование числа импульсов преимущественно применяется в кодовых цифровых устройствах и осуществляется с помощью счетчиков импульсов, при этом при совпадении импульсов появляется погрешность суммирования. Для уменьшения такой погрешности уменьшают длительность импульсов или применяют логические запоминающие схемы.

Применяются также методы суммирования сопротивлений, емкостей, индуктивностей, вращающихся моментов, угловых или линейных перемещений. Суммирование сопротивлений или емкостей применяется, например, в передатчиках частотных телеизмерительных устройств. Эти методы суммирования, однако, труднее поддаются унификации, и поэтому их применение ограничено.

Для суммирования величин в цифровом виде применяются более универсальные вычислительные устройства и ЭВМ, которые могут выполнять также усреднение, линеаризацию, масштабирование, интегрирование и обработку информации по более сложной программе.

Ранее были рассмотрены только некоторые характеристики устройств телеизмерений. Характеристики систем телеизмерений можно разделить на следующие группы:

1) телеизмеряемые параметры, их число и типы первичных преобразователей;

2) уровни сигналов и их динамический диапазон на входе и выходе различных частей системы (первичный преобразователь, передатчик, канал связи, приемник, выходной прибор);

3) глубина модуляции и коды в различных частях системы;

4) спектр частот в канале связи и время установления показаний по выходному прибору;

5) погрешности телеизмерений;

6) помехоустойчивость и надежность системы телеизмерений;

7) отображение информации.

Некоторые из этих характеристик были рассмотрены в этой главе и в первой части книги, остальные будут излагаться при описании принципов построения устройств телеизмерений.

12.4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ

Телеизмеряемые величины во многих случаях можно рассматривать как случайные параметры, для которых необходимо знать основные статистические характеристики, определяемые по данным прямых измерений.

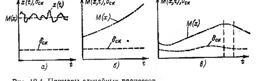


Рис 12.4. Примеры случайных процессов

К характеристикам случайных величин относят в первую очередь законы распределения вероятностей, спектральные и корреляционные функции. На рис. 12.4 даны примеры случайных стационарных и нестационарных процессов с математическим ожиданием $M(x)$ и средним квадратическим отклонением $\delta_{ск}$. На рис. 12.4, *а* дан пример стационарного процесса $x(t)$, у которого $M(x) = \text{const}_1$ и $\delta_{ск} = \text{const}_2$, а на рис. 12.4, *б* — нестационарного процесса с $M(x) = \text{varia}$ и $\delta_{ск} = \text{const}$. На рис. 12.4, *в* приведен при-

мер часто встречающегося нестационарного процесса с квазипериодическими математическим ожиданием $M(x)$ и средним квадратическим отклонением $\delta_{\text{ск}}$. Так может изменяться математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение для брака выпускаемой продукции, количество пожаров в квартирах в единицу времени и т.д. Квазипериодический характер $M(x)$ и $\delta_{\text{ск}}$ с временем цикла, равным одному дню или одному году, вызван связью

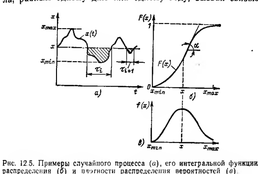


Рис. 12.5. Примеры случайного процесса (*а*), его интегральной функции распределения (*б*) и плотности распределения вероятностей (*в*).

жизнедеятельности человека с временем суток, года, началом смен и т.д. Такие нестационарные процессы с известным приближением можно считать стационарными на более коротком отрезке времени, который, например, выделен на рис. 12.4, *в* пунктиром.

Если дан случайный процесс $x(t)$ (рис. 12.5, *а*), например напряжение с первичного преобразователя, то одномерная интегральная функция распределения вероятностей $F(x)$ определяется как вероятность P нахождения значения $x(t)$ ниже уровня x:

$$F(x) = P(-\infty \leqslant x(t) \leqslant x), \qquad (12.21)$$

где x может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$. Тогда значение интегральной функции $F(x)$ при изменении x от $-\infty$ до $+\infty$ будет равно:

$$F(-\infty) = 0; \quad F(+\infty) = 1. \qquad (12.22)$$

На рис. 12.5, *а* в качестве примера показано, что функция изменяется в ограниченных пределах от x_{min} до x_{max} и дано построение интегральной функции распределения $F(x)$ (рис. 12.5, *б*) путем суммирования временных интервалов τ_i, заштрихованных на рис. 12.5, *а*. Тогда в соответствии с (12.21)

$$F(x) = \lim_{T\to\infty} \Sigma\tau_i/T. \qquad (12.23)$$

Дифференциальный закон распределения вероятностей от случайного процесса $x(t)$, называемый плотностью распределения вероятностей $f(x)$, получают путем дифференцирования $F(x)$ по x:

$$f(x) = dF(x)/dx; \qquad (12.24)$$

$f(x)\,dx$ — вероятность P нахождения процесса в интервале от x до $x+dx$:

$$f(x)\,dx = P\,[x < x(t) \leqslant x + dx]. \qquad (12.25)$$

Для определения плотности распределения вероятностей $f(x)$ по интегральной функции распределения (рис. 12.5, *б*) для каждого значения x определяют производную

$$f(x) = dF(x)/dx = \operatorname{tg}\alpha \qquad (12.26)$$

как тангенс угла α для каждого значения x на рис. 12.5, *б*. Так построена зависимость $f(x)$ на рис. 12.5, *в*. Широко применяются одноканальные и многоканальные анализаторы для измерения законов распределения амплитуд импульсов, интервалов времени между импульсами, интенсивности случайных процессов в пространстве и т. д. В анализаторах используются различные аналоговые и цифровые узлы, элементы памяти, коммутаторы и устройства отображения [43, 61].

Математическое ожидание случайного процесса $x(t)$ есть предел, к которому стремится $x(t)$:

$$M[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,f(x,t)\,dx, \qquad (12.27)$$

где $f(x)$ — плотность распределения $x(t)$.

Математическое ожидание стационарного процесса

$$M(x) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,dt. \qquad (12.28)$$

При стационарном эргодическом процессе корреляционная функция $R_x(\tau)$ может быть определена как математическое ожидание произведения центрированных значений $x_0(t)$ в моменты времени t и $t+\tau$:

$$R_x(\tau) = M[x_0(t)\,x_0(t+\tau)] = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T x_0(t)\,x_0(t+\tau)\,d\tau, \quad (12.29)$$

где для центрированных значений $x_0(t)$ математическое ожидание $M(x_0)=0$.

При определении погрешностей в одной точке x шкалы используются следующие характеристики [41, 43].

Математическое ожидание погрешности в точке x (первый начальный момент):

$$M_x(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta W_x(\Delta)\,d\Delta, \quad (12.30)$$

где в соответствии с (12.7) $\Delta = x_и - x_д$ — разность измеренного и действительного значений величины x; $W_x(\Delta)$ — плотность распределения вероятностей погрешности в точке x.

Дисперсия (второй центральный момент)

$$D_x(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\Delta - M_x(\Delta)]^2\, W_x(\Delta)\,d\Delta. \quad (12.31)$$

Среднее квадратическое отклонение погрешностей в точке x

$$\sigma_x(\Delta) = \sqrt{D_x(\Delta)}. \quad (12.32)$$

Второй начальный момент

$$\Lambda_x(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2\, W_x(\Delta)\,d\Delta. \quad (12.33)$$

Средняя квадратическая погрешность в точке x

$$\lambda_x(\Delta) = \sqrt{\Lambda_x(\Delta)}. \quad (12.34)$$

Среднее квадратическое отклонение погрешностей $\sigma_x(\Delta)$ характеризует разброс погрешностей относительно математического ожидания, а средняя квадратическая погрешность $\lambda_x(\Delta)$ — относительно нулевого значения.

В соответствии со сказанным математическое ожидание $M_x(\Delta)$ погрешности — это систематическая погрешность, а среднее квадратическое отклонение погрешности $\sigma_x(\Delta)$ — среднее квадратическое значение случайной погрешности (абсолютные значения). Это иллюстрируется на рис. 12.6, где приведены зависимости плотности распределения вероятностей погрешностей $W_x(\Delta)$ в точке x для двух приборов (кривые 1 и 2). Первый прибор имеет меньший разброс погрешностей относительно математического ожида-

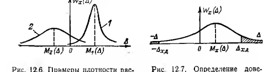


Рис. 12.6. Примеры плотности распределения вероятностей погрешности.

Рис. 12.7. Определение доверительной погрешности $\Delta_{xд}$

ния $M_1(\Delta)$, но $M_1(\Delta) > M_2(\Delta)$. Второй прибор (кривая 2) имеет, наоборот, меньшее значение средней погрешности $M_2(\Delta)$, но больший разброс погрешностей относительно математического ожидания.

Возникает вопрос, какой прибор лучше? Для ответа на этот вопрос необходим обобщенный критерий. Одним из таких обобщенных критериев является доверительная погрешность $\Delta_{xд}$ в точке x, определяемая из следующего условия: вероятность того, что модуль погрешности превысит $\Delta_{xд}$, должна быть равна заданному малому значению

$$\varepsilon = P(|\Delta| > \Delta_{xд}) = 1 - \int_{-\Delta_{xд}}^{+\Delta_{xд}} W_x(\Delta)\, d\Delta. \qquad (12.35)$$

Графически (12.35) иллюстрируется на рис. 12.7, где суммарная площадь заштрихованных участков (за пределами $\Delta_{xд}$) равна ε [суммарная площадь $W(\Delta)$ равна 1].

Были рассмотрены статистические характеристики погрешностей в точке x шкалы.

Для объективной оценки всего измерительного или телеизмерительного устройства в целом, т. е. по всей шкале, применяют такие *характеристики*, как математическое ожи-

дание $M(\Delta)$ и среднее квадратическое отклонение погрешности $\sigma(\Delta)$, усредненные по всей шкале с учетом закона распределения измеряемой величины по шкале.

Математическое ожидание погрешности устройства в целом (по всей шкале)

$$M(\Delta) = \int_X M_x(\Delta) W(x)\, dx, \qquad (12.36)$$

где $W(x)$ — плотность распределения измеряемой величины x; X означает, что интегрирование проводится по всему диапазону x, т. е. по всей шкале.

Следовательно, $M(\Delta)$ определяется путем усреднения математических ожиданий погрешности, определенных отдельно для каждой точки шкалы.

Для получения более обобщенного показателя принято задавать некоторую условную измеряемую величину x с равномерным законом ее распределения в пределах шкалы $(x_{нач}—x_{кон})$:

$$W(\bar{x}) = \begin{cases} 0 \text{ при } x < x_{нач}; \\ 1/(x_{кон} - x_{нач}) \text{ при } x_{нач} \leqslant x \leqslant x_{кон}; \\ 0 \text{ при } x > x_{кон}. \end{cases} \qquad (12.37)$$

Для такого равномерного закона распределения $W(x)$ из (12.36) и (12.37) получаем:

$$M(\Delta) = \frac{1}{x_{кон} - x_{нач}} \int_{x_{нач}}^{x_{кон}} M_x(\Delta)\, dx. \qquad (12.38)$$

Квадрат средней квадратической погрешности устройства в целом по всей шкале

$$\lambda^2(\Delta) = \int_X [\lambda_x(\Delta)]^2 W(x)\, dx. \qquad (12.39)$$

Здесь, так же как и в (12.36), средняя квадратическая погрешность по всей шкале находится путем усреднения квадратов средних квадратических погрешностей в отдельных точках шкалы с учетом закона распределения измеряемой величины $W(x)$.

С целью получения более обобщенного показателя погрешности для условного равномерного закона распределения $W(x)$ параметра x в пределах шкалы $(x_{нач}—x_{кон})$ аналогично (12.37) получим:

$$\Lambda^2(\Delta) = \frac{1}{x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}} \int\limits_{x_{\text{нач}}}^{x_{\text{кон}}} \Lambda_x(\Delta)\, dx. \qquad (12.40)$$

При определении погрешностей необходимо производить достаточно большое число независимых измерений, а согласно математической статистике для большого числа независимых составляющих, без резко доминирующих, закон распределения приближается к нормальному (гауссовскому):

$$W(\Delta) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\, e^{-[\Delta - M(\Delta)]^2/2\sigma^2}. \qquad (12.41)$$

Для нормального закона распределения доверительная погрешность

$$\Delta_{\text{д}} \approx |M(\Delta)| + 2\delta \text{ при } \varepsilon = 0{,}05$$

и

$$\Delta_{\text{д}} = |M(\Delta)| + 3\delta \text{ при } \varepsilon = 0{,}003.$$

Значение ε выбирается из (12.35). В результате проведенных исследований как критерий точности рекомендуется принять величину

$$\Delta_{\text{д}} = |M(\Delta)| + 2\delta. \qquad (12.42)$$

Для расчетов рекомендуется также использовать $\lambda(\Delta)$, а для экспериментов Δ_{max}, которая обычно приближается к

$$\Delta_{\text{д}} \approx \Delta_{max}. \qquad (12.43)$$

Приведенные характеристики погрешностей можно определить на основе измерений (экспериментально) без предварительного знания закона распределения $W_x(\Delta)$ по следующим формулам:

$$M_x(\Delta) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta_i; \qquad (12.44)$$

$$D_x(\Delta) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [\Delta_i - M_x(\Delta)]^2; \qquad (12.45)$$

$$\Lambda_x(\Delta) \approx \frac{1}{n} \sum^{n} \Delta_i^2; \qquad (12.46)$$

$$|\Delta_x|_{ср} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |\Delta_i|, \qquad (12,47)$$

где Δ_i — погрешность i-го контрольного измерения; n — число контрольных измерений.

Обычно при этом ограничиваются числом измерений $n=20 \div 30$, в то время как для установления закона распределения $W_x(\Delta)$ требуется во много раз большее число измерений.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

УСТРОЙСТВА ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ

13.1. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Устройством интенсивности называется устройство, у которого значение постоянного тока или напряжения в линии связи пропорционально значению телеизмеряемого параметра или функционально связано с ним. Эти простейшие устройства относятся к устройствам ближнего действия и требуют выделенной физической проводной ЛС, что приводит к неэффективному ее использованию и затрудняет унификацию аппаратуры. Дальность действия устройств интенсивности при воздушной проводной линии ЛС не превышает примерно 7 км, а для кабельной 20 км.

Применяются устройства интенсивности токовые и напряжения. В первых телеизмеряемая величина передается током в ЛС, а режим работы передающего устройства близок к короткому замыканию, в то время как во вторых передаваемое значение пропорционально напряжению в ЛС, при этом режим работы соответствует холостому ходу. На приемной стороне в устройствах напряжения устанавливается высокоомный выходной прибор, почти не потребляющий мощности. Устройства интенсивности разделяются также на небалансные и балансные. В балансных устройствах для уменьшения погрешностей применяются более сложные компенсационные схемы с обратными связями на передающей стороне.

На рис. 13.1, *а* приведена структурная схема наиболее простого небалансного токового устройства интенсивности. Измеряемая величина x подается на вход небалансного

преобразователя *НП*, который преобразует величину x в пропорциональный ей постоянный ток

$$I_1 = kx,$$

где k — постоянный коэффициент.

Для уменьшения влияния возможных изменений сопротивления проводной линии связи *ЛС* последовательно с линией на передающей стороне включается балластное сопротивление $R_б$ (около 3 кОм). Выходной прибор *ВП* измеряет ток в конце линии $I_{вых}$.

Рис. 13.1. Структурная схема небалансного токового устройства телеизмерений (*а*) и его упрощенная эквивалентная схема (*б*).
НП — небалансный преобразователь; $R_б$ — балластное сопротивление; *ВП* — выходной прибор.

На рис. 13.1, *б* представлена Т-образная схема замещения проводной линии связи. Уравнения Кирхгофа для этой схемы имеют вид:

$$E = I_1 (r_1 + R_л/2) + I_у R_у;$$

$$0 = - I_у R_у + I_{вых} (r_2 + R_л/2). \quad (13.1)$$

Решив эти уравнения, получим:

$$I_{вых} = I_1 - I_у = \frac{E}{r_1 + r_2 + R_л + R_л (r_1 + R_л/2)/2R_у + r_2 (r_1 + R_л/2) R_у}, \quad (13.2)$$

где E — ЭДС на выходе небалансного преобразования; r_1 — полное (суммарное) сопротивление передающего устройства, r_2 — полное сопротивление приемного устройства, включая выходной прибор *мА*; $R_л = l r_л$ — последовательное сопротивление ЛС; $r_л$ — погонное последовательное сопротивление ЛС (на 1 км); l — длина ЛС, км; $R_у = r_у/l$ — полное сопротивление утечки ЛС; $r_у$ — погонное сопротивление утечки ЛС (на 1 км); $I_у$ — ток утечки.

При отсутствии утечки в ЛС ($R_у = \infty$) выражение (13.2) упрощается:

$$I_{вых} = E/(r_1 + r_2 + R_л) = E/R, \qquad (13.3)$$

где $R = r_1 + r_2 + R_л$.

При изменении сопротивления ЛС на $\Delta R_л \ll R$

$$I'_{вых} = E/(R + \Delta R_л). \qquad (13.4)$$

Относительная погрешность измерений, %,

$$\delta = (I_{вых} - I'_{вых})\,100/I_{вых} = -\,\Delta R_л \cdot 100/(\Delta R_л + R_л + r_1 + r_2). \qquad (13.5)$$

На рис. 13.2 в качестве примера даны зависимости относительной погрешности δ от длины линии l при 10 %-ном

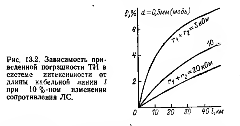


Рис. 13.2. Зависимость приведенной погрешности ТИ в системе интенсивности от длины кабельной линии l при 10 %-ном изменении сопротивления ЛС.

изменении сопротивления $R_л$ кабельной линии связи с диаметром медной жилы 0,5 мм (телефонный кабель). Эти зависимости рассчитаны по (13.5) при $R_у = \infty$.

В реальных условиях погонное последовательное сопротивление воздушной или кабельной линии связи $r_л$ может изменяться от нескольких ом до нескольких сотен ом на километр (см. табл. 4.2). Относительное изменение сопротивления $R_л$ воздушной ЛС из-за климатических условий достигает 40 %, в то время как изменение $R_л$ кабельной ЛС составляет 5—15 %. Минимальное нормированное сопротивление утечки воздушной ЛС $r_{у\,min} = 2$ МОм/км, а для реальных ЛС во время дождя оно может уменьшаться до нескольких сотен килом на километр. Сопротивление утечки кабельных линий во много раз выше и мало зависит от климатических условий. Поэтому для кабельных ЛС во многих случаях можно принимать $R_у = \infty$.

В зависимости от типа преобразователя небалансные токовые устройства телеизмерений называются выпрямительными, индукционно-выпрямительными, генераторными и с преобразователями сопротивления.

Как отмечалось ранее, системы интенсивности разрабатывались на заре развития телемеханики и еще сохранились, например, в энергосистемах. Они работают с выделенными физическими ЛС длиной до 7—20 км и не удовлетворяют современным требованиям по унификации и погрешностям измерений. В связи с этим более подробное

Рис. 13.3. Структурная схема время-импульсной системы телеизмерений.

описание систем интенсивности можно найти в ранее изданных учебных пособиях по телеизмерениям и телемеханике, например в [47].

Группу время-импульсных (аналоговых)устройств телеизмерения составляют устройства с широтной и время-импульсной модуляцией, у которых измеряемая величина пропорциональна временному интервалу.

Структурная схема время-импульсной системы телеизмерений приведена на рис. 13.3. Первичный преобразователь *ПП* преобразует измеряемую величину x в унифицированный параметр z, а передающее устройство преобразует величину z в интервал времени τ. На приемной стороне осуществляется обратное преобразование в напряжение u, ток I или число импульсов N при цифровом отсчете. Первичный преобразователь *ПП* может отсутствовать, если x преобразуется непосредственно в τ.

К простейшим время-импульсным устройствам относится длиннопериодное устройство, разработанное в институте НИПИнефтехимавтомат, применяемое для телеизмерения давления и расхода на трубопроводах. Измеряемый параметр преобразуется в угол поворота обычного стрелочного прибора (манометра, расходомера и др.), который

одновременно служит первичным преобразователем измеряемой величины. Передатчик телеизмерений (рис. 13.4) представляет собой приставку к типовому стрелочному прибору, например манометру, и преобразует угол поворота стрелочного прибора в интервал времени между начальным (маркерным) и рабочим импульсами.

В начале телеизмерений по вызову с ПУ передается маркерный импульс, вызывающий срабатывание электромагнита, освобождающего опрашивающую стрелку, которая начинает равномерно вращаться от нулевого положения по часовой стрелке. Стрелка приводится в движение типовым пружинным часовым механизмом *ЧМ*. В момент, когда опрашивающая стрелка проходит над основной указывающей стрелкой прибора, срываются колебания вспомогательного генератора и в канал связи передается рабочий импульс телеизмерения. Чем больше угол поворота рабочей стрелки, тем больше временной интервал между маркерным и рабочим импульсами. Так осуществляется преобразование измеряемого параметра в интервал времени τ.

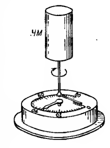


Рис. 13.4. Передатчик время-импульсного устройства телеизмерений с часовым механизмом *ЧМ*.

По завершении одного оборота опрашивающая стрелка упирается в якорь реле и остается в таком положении до прихода нового вызова телеизмерения (стартстопный принцип). Время одного цикла составляет 2—30 с. Часовой механизм обеспечивает достаточное число оборотов опрашивающей стрелки для работы в течение года.

Приемник системы телеизмерений на ПУ имеет электрическую схему, запускаемую маркерным импульсом при вызове ТИ и останавливаемую рабочим импульсом, принимаемым с передатчика ТИ. Приемник измеряет время между маркерным и рабочим импульсами, имеет цифровые индикатор и регистрацию измеряемого параметра на цифропечатающей машинке. К недостаткам описанного устройства относится применение изделий точной механики, которые трудно эксплуатировать в тяжелых условиях нефте-

газовой промышленности в неотапливаемых помещениях.

Вторым примером время-импульсного устройства телеизмерений может служить устройство с экспоненциальными преобразователями типа ВСТ, разработанное в Институте автоматики и телемеханики, для телеизмерения неэлектрических параметров [9, 37]. Устройство работает с потенциометрическим первичным преобразователем давления, расхода газа или жидкости, уровня и т. д., преобразующим значение угла поворота в значение сопротивления.

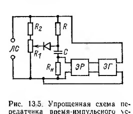


Рис. 13.5. Упрощенная схема передатчика время-импульсного устройства телеизмерений типа ВСТ.
ЭР — электронное реле; ЗГ — звуковой генератор

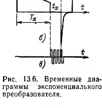


Рис. 13.6. Временные диаграммы экспоненциального преобразователя.

Для этого на оси манометра или другого прибора устанавливается потенциометр с малым моментом вращения. Такие первичные преобразователи выпускаются промышленностью серийно. Для ВСТ не требуются местные источники питания на контролируемом пункте, его передатчик построен на основе бесконтактных элементов. Он состоит (рис. 13.5) из экспоненциального преобразователя, электронного реле *ЭР* на двух транзисторах и генератора с фиксированной звуковой частотой *ЗГ*, который одновременно является вторым каскадом электронного реле. Передатчик питается через проводную ЛС с ПУ импульсами прямоугольной формы (рис. 13.6). Длительность импульсов 1,7 с, а интервал между ними 0,3 с. Импульсы одновременно синхронизируют работу передатчика и приемника.

Экспоненциальный преобразователь представляет собой электрический мост, в одну ветвь которого (см. рис. 13.5) включены резисторы R_1 и R_2, а в другую — резистор R и конденсатор C. Выходное напряжение преобразователя сни-

мается с резистора $R_{\text{п}}$ ($R_{\text{н}} \ll R$, $R_1 + R_2 \ll R$). При подаче на мост импульса постоянного тока диод, включенный в диагональ моста, закрывается и остается закрытым до момента, пока напряжение на конденсаторе не возрастет до напряжения на сопротивлении R_1. Заряд конденсатора C через сопротивление R продолжается в течение интервала времени (рис. 13.6, *б*)

$$T_x = RC \ln \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \qquad (13.6)$$

В момент t_x диод открывается и ток заряда конденсатора C прекращается ($R \gg R_1$). В момент t_x напряжение на $R_{\text{н}}$ уменьшается до нуля и срабатывает электронное реле *ЭР*, которое включает генератор звуковой частоты *ЗГ*. Генератор продолжает генерировать колебания до окончания питающего импульса постоянного тока (рис. 13.6, *в*). Импульс фиксированной звуковой частоты передается по ЛС на приемник телеизмерений. В приемнике измеряется временно́й интервал T_x между началом импульса постоянного тока (рис. 13.6, *а*) и началом импульса звуковой частоты. Временно́й интервал T_x, как видно из приведенной формулы, не зависит от напряжения питания.

К положительным свойствам рассмотренного время-импульсного устройства телеизмерения следует отнести небольшую полосу частот, занимаемую в канале связи (эффективное использование канала связи), и простоту преобразования измеряемого временно́го интервала в показания выходного цифрового прибора, которое достигается путем включения звукового генератора на время T_x, пропорциональное значению измеряемого параметра и автоматического подсчета числа периодов генератора электронным счетчиком в заданной системе счисления. На выходе счетчика включается выходной прибор с цифровым отсчетом.

С учетом внутреннего сопротивления генератора импульсов R_i (включая сопротивление линии связи)

$$T_x = (R + kR_i)\, C \ln [1 + RR_2/R_1 (R + kR_i)], \qquad (13.7)$$

где $k = (R_1 + R_2)/(R_i + R_1 + R_2)$.

Для $R \geqslant R_i$ и $R \gg R_1 + R_2$

$$T_x = (R + kR_i)\, C \ln \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \qquad (13.8)$$

При изменении внутреннего сопротивления на ΔR_i погрешность измерения

$$\delta = k\Delta R_i/(R + kR_i). \qquad (13.9)$$

Характеристики реальных диодов отличаются от идеализированной линейно-ломаной характеристики с изломом в нуле, поэтому диоды начинают пропускать ток раньше момента времени t_x (рис. 13.6, *б*). Кроме того, в момент открытия t_x диода ток через конденсатор C и нагрузку уменьшается до нуля не мгновенно, а с постоянной времени

$$\tau = C\,(R_н + R_{пр} + R_1), \qquad (13.10)$$

где $R_н$ — сопротивление нагрузки; $R_{пр}$ — прямое сопротивление диода; R_1 — сопротивление, с которого снимается напряжение на диод (см. рис. 13.5).

Тогда выражение для тока через конденсатор можно записать в следующем виде:

$$i_н \approx \frac{U}{R + R_н} e^{-t/\tau} \text{ при } t \leqslant t_x; \quad i_н \approx \frac{U}{R + R_н} e^{-t_c/\tau - (t - t_c)/\tau_2}$$
$$\text{при } t > t_x. \qquad (13.11)$$

Удлинение заднего фронта импульса в реальных схемах приводит к увеличению зависимости ширины импульса от порога срабатывания диода и формирующей выходной цепи.

Устройство ВСТ имеет логарифмическую зависимость между длительностью T_x и сопротивлением датчика R_1 ($R_1 \ll R$):

$$T_x = RC \ln \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \qquad (13.12)$$

На приемной стороне для обратного функционального преобразования длительности импульса в напряжение заряда конденсатора используется RC-схема с такой же, как и в передающем устройстве, постоянной времени $\tau = RC$. Выходное напряжение приемника при этом (напряжение, до которого заряжается конденсатор C за время τ) экспоненциально зависит от τ и линейно от R_1. Действительно, использовав (13.6), получим:

$$u_c = u_{вых} e^{\tau/RC} = UR_1/(R_2 + R_1). \qquad (13.13)$$

Модернизированное устройство ВСТ выпускается для газовой промышленности и работает совместно с комплексной системой ТУ—ТС—ТИ. Система имеет цифровой ог-

счет и цифропечатание на типовой электрифицированной машинке. Погрешность телеизмерений составляет 0,4 %, дальность — до 80 км.

Один общий приемник телеизмерений на ДП работает в режиме телеизмерений по вызову со многими передающими устройствами, рассредоточенными по трубопроводу. Это телеизмерительное устройство получило массовое применение в СССР.

Группу частотных устройств телеизмерений составляют устройства с частотной и частотно-импульсной модуляцией,

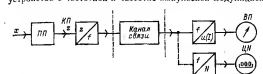


Рис. 13.7. Структурная схема частотной системы телеизмерений.

у которых измеряемая величина пропорциональна или функционально связана с частотой синусоидального или импульсного сигнала в канале связи. Передатчиком частотно-импульсного устройства служит управляемый импульсный генератор, частота которого пропорциональна или функционально связана со значением параметра, подаваемого на его вход. Следовательно, управляемый импульсный генератор является преобразователем значения измеряемого параметра (мощности, напряжения, тока, сопротивления и т. п.) в частоту импульсных колебаний.

На рис. 13.7 приведена структурная схема частотной системы телеизмерений. Здесь первичный преобразователь ПП преобразует измеряемую величину в унифицированную z (ток, напряжение или др.).

В передающем устройстве величина z преобразуется в частоту f. В приемном устройстве производится обратное преобразование частоты f в напряжение u, ток I или число импульсов N при цифровом отсчете. В ряде случаев измеряемая величина x может непосредственно преобразовываться в частоту f без первичного преобразователя.

На рис. 13.8 приведена схема простейшего частотно-импульсного устройства телеизмерений мощности электрического тока, в котором на оси электрического счетчика энер-

гии *1* установлен диск с равномерными прорезями *2*. В таком фотоэлектрическом преобразователе частота импульсов на выходе фотоэлемента *4* и частотомера *6* пропорциональна телеизмеряемой мощности.

Рассмотрим более подробно работу одного из простейших частотно-импульсных устройств телеизмерений, разработанного ЦНИИКА. Передатчиком здесь служит управляемый импульсный генератор-мультивибратор Роера, преобразующий постоянный ток или напряжение в пропорциональную им частоту импульсов f (рис. 13.9, *а*). Он состоит из трансформатора Tp с

Рис 13.8. Частотно-импульсное устройство телеизмерения электрической мощности

1 — электрический счетчик; *2* — диск с прорезями; *3* — источник света; *4* — фотоэлемент; *5* — усилитель; *6* — частотомер.

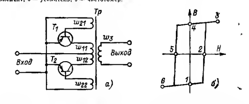


Рис 13.9. Упрощенная схема передатчика частотно-импульсного устройства телеизмерений с мультивибратором Роера (*а*), имеющего сердечник с прямоугольной петлей гистерезиса (*б*).

сердечником, имеющим прямоугольную петлю гистерезиса, и двух транзисторов T_1 и T_2.

При подаче на вход преобразователя напряжения из-за неодинаковых характеристик транзисторов коллекторный ток одного из них (например, T_1) будет нарастать бы-

стрее, чем другого. Вследствие этого магнитный поток Ф, создаваемый обмоткой w_{11}, будет больше, чем поток, создаваемый обмоткой w_{12}. Разность этих потоков вызывает на обмотках w_{21} и w_{22} напряжение такой полярности, что напряжение с обмотки w_{21}, подаваемое на базу транзистора T_1, еще больше открывает его, а соответственно напряжение на w_{22} еще больше закрывает транзистор T_2 (полярность индуктируемых напряжений на базах противоположна). Происходит регенеративный процесс, в результате которого полностью открывается транзистор T_1 и закрывается транзистор T_2. При этом сердечник трансформатора перемагничивается по ветви петли гистерезиса *1—2—3* (рис. 13.9, *б*).

Когда индукция B в сердечнике достигает значения, соответствующего на петле гистерезиса точке *3* (горизонтальная часть), ЭДС, наводимые в обмотках w_{21} и w_{22}, резко уменьшаются. Это вызывает уменьшение коллекторного тока транзистора T_1, а следовательно, наведение ЭДС, открывающей транзистор T_2, и появление коллекторного тока в нем. На обмотках w_{21} и w_{22} наводятся напряжения противоположной полярности, первое из которых открывает транзистор T_2, а второе закрывает транзистор T_1. Происходит следующий регенеративный процесс, и транзистор T_2 открывается полностью, а транзистор T_1 закрывается. При этом происходит перемагничивание сердечника по ветви *4—5—6* петли гистерезиса до тех пор, пока индукция B в сердечнике не достигнет значения, соответствующего точке *6*. Далее процесс повторяется периодически.

Частота генератора определяется временем перемагничивания сердечника, в течение которого входное напряжение уравновешивается ЭДС самоиндукции:

$$u = -w_1\, d\Phi/dt, \qquad (13.14)$$

где w_1 — число витков; Ф — магнитный поток.

Интегрируя это выражение за полпериода $T/2$ (время действия одного импульса ЭДС) и считая преобразователь идеальным, получаем:

$$\int_0^{T_2} u dt = -w_1 \int_{-\Phi_{max}}^{+\Phi_{max}} d\Phi \text{ или } uT/2 = 2w_1\Phi_{max}. \qquad (13.15)$$

Из (13.15) следует, что частота пропорциональна входному напряжению:

$$f = 1/T = u/4w_1\Phi_{max}. \qquad (13.16)$$

Выбираемые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса имеют постоянное значение потока Φ_{max}, а так как число витков w_1 также постоянно, частота определяется напряжением. В системе ЦНИИКА рабочий диапазон частот выбран от 4 до 20 Гц. Основная погрешность передатчика $\delta = 1{,}5$ %

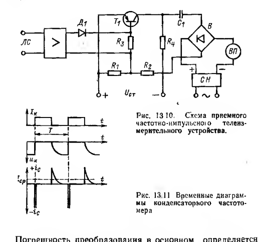


Рис. 13.10. Схема приемного частотно-импульсного телеизмерительного устройства.

Рис. 13.11 Временные диаграммы конденсаторного частотомера

Погрешность преобразования в основном определяется стабильностью характеристик ферромагнитного сердечника во времени и при изменении температуры окружающей среды. К недостаткам такого передающего устройства относится сравнительно низкое и непостоянное входное сопротивление, которое изменяется с увеличением входного напряжения. Кроме того, изменение сопротивления на входе приводит к появлению погрешности.

Простейшим приемным устройством в системе ЦНИИКА служит конденсаторный частотомер на транзисторе (рис. 13.10), питаемый от стабилизированного источника $U_{ст} = 45$ В. В делителе напряжения $R_1 \ll R_2$. При отсутствии входного сигнала транзистор T_1 открыт, падение напряже-

ния на сопротивлении R_4 близко к $U_{ст}$ и почти не зависит от характеристик транзистора (при смене транзисторов). На рис. 13.11 приведены временные диаграммы коллекторного тока $I_к$, коллекторного напряжения $u_к$ и тока через конденсатор i_c.

На вход транзистора T_1 (см. рис. 13.10) подаются усиленные однополярные импульсы измеряемой частоты (после диода $Д_1$), которые на время импульса запирают транзистор. С частотой импульсов перезаряжается конденсатор C_1 до постоянного напряжения $U_{ст}$. Нормированный зарядный и разрядный токи конденсатора выпрямляются диодным выпрямителем *В*. Нормированные импульсы зарядного и разрядного токов через конденсатор C_1 определяются постоянным напряжением $U_{ст}$ и временем заряда и разряда конденсатора C_1, поэтому постоянная составляющая тока через выходной прибор *ВП* пропорциональна частоте следования импульсов ($f \ll 1/RC$). Нагрузкой служит магнитоэлектрический прибор *ВП*, измеряющий среднее значение выпрямленного тока. Устройство *СН* создает постоянное смещение нуля, чтобы на минимальной частоте $F_0=4$ Гц ток через прибор *ВП* был равен нулю. Для этого служит выпрямитель, напряжение которого стабилизируется с помощью кремниевого опорного транзистора. Номинальный ток через прибор *ВП* равен 1 мА при сопротивлении нагрузки 300 Ом. Основная погрешность частотомера 1,5 %. Применяются и другие, более сложные схемы частотомеров с несколько меньшими погрешностями и бо́льшими выходными токами.

К недостаткам частотных устройств телеизмерения относятся относительно большая полоса частот, занимаемая в канале связи, и более сложное, чем во время-импульсных системах, преобразование частоты в код при цифровом воспроизведении или цифропечати. Во время-импульсных устройствах телеизмерений для преобразования измеряемого интервала в код счетчик считает в течение измеряемого интервала число периодов генератора образцовой (стабильной) частоты. В частотных устройствах необходимо считать число периодов измеряемой частоты в течение выбранного стабильного интервала времени, что в ряде случаев требует несколько более сложной аппаратуры.

Кроме того, преобразователь напряжение — интервал времени или перемещение — интервал времени может быть общим унифицированным преобразователем, включаемым на передающей стороне как во время-импульсных устройст-

вах с цифровым отсчетом, так и в кодо-импульсных устройствах. Различие между этими устройствами будет заключаться главным образом в том, что преобразователь аналог — цифра (интервал времени — цифра) во время-импульсном устройстве включается на приемной стороне, а в кодо-импульсных устройствах — на передающей.

Бо́льшая часть устройств телеизмерений, работающих совместно с устройствами телеуправления и телесигнализации в нефтяной, газовой промышленности, ирригации и в ряде других отраслей народного хозяйства, имеет цифровой отсчет и цифропечатание при аналоговом способе передачи телеизмеряемой величины по каналу связи. Такие устройства с цифровым выходом относятся к цифровым устройствам телеизмерений и частично были описаны ранее. В них в основном используется время-импульсный метод передачи сигналов по каналу связи. Преобразование сигналов в цифровую форму производится на приемной стороне, где включается преобразователь аналог — цифра. Устройства работают, главным образом, в режиме ТИ по вызову, и с интервалом 15—60 мин производится автоматическая цифровая регистрация на электрифицированной пишущей машинке с фиксацией времени регистрации или ввод информации в ЭВМ. Цифровая часть систем состоит из функциональных узлов, описанных в гл. 10.

13.2. КОДО-ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА

В кодо-импульсных устройствах телеизмерений преобразование сигналов в цифровую форму производится на передающей стороне преобразователем аналог — цифра (аналого-цифровой преобразователь — АЦП), а в канале связи передаются импульсно-кодовые сигналы в виде кодовых комбинаций.

На рис. 13.12 приведена структурная схема передающего устройства одноканальной кодо-импульсной системы телеизмерений. Измеряемая величина x преобразуется в первичном преобразователе *ПП* в унифицированный параметр z (обычно ток или напряжение) и подается на аналого-цифровой преобразователь *АЦП*. На выходе *АЦП* образуется двоичный, двоично-десятичный или, реже, какой-либо другой параллельный цифровой код. Для передачи по каналу связи параллельный код преобразуется в последовательный в преобразователе *Пр—Пс* обычно путем последовательного считывания кодовых комбинаций с элемен-

тов памяти или продвижения регистра с заданной скоростью с записанным кодом.

В формирователе кодовых сигналов *ФКС* осуществляется формирование серии видеоимпульсных кодовых сигналов для передачи их в канал связи. С этой целью в начале кодовой комбинации добавляются синхронизирующий сигнал и код адреса, а при необходимости повышения помехоустойчивости к информационной кодовой комбинации добавляются контрольные разряды в соответствии с выбранным помехоустойчивым кодом (см. гл. 3 и 5). Синхронизирующий сигнал в виде одиночного удлиненного импульса или специальной кодовой комбинации размещается перед началом кодовой комбинации. Управление последовательностью действия узлов осуществляется управляющим узлом *УУ*, а скорость работы, т. е. частота последовательности импульсов, задается генератором тактовых импульсов *ГТИ*. На вход модулятора *М* подаются кодовые видеоимпульсные сигналы. В модуляторе они преобразуются в радиоимпульсные кодовые сигналы для согласования с каналом связи по пропускаемым частотам.

Рис. 13.12. Структурная схема передающего устройства одноканального кодо-импульсного устройства ТИ.

На рис. 13.13 *а* и *б* дан пример временны́х диаграмм кодо-импульсных сигналов соответственно на входе и выходе амплитудного модулятора. Здесь синхронизирующий сигнал *СИ* передается в виде удлиненного импульса. Величина телеизмеряемого параметра передается 7-разрядным двоичным натуральным кодом, а вся кодовая комбинация — кодом с защитой на четность. Скважность импульсов $Q=2$. Глубина модуляции $m=100\ \%$.

Обобщенная структурная схема приемного кодо-импульсного устройства телеизмерений приведена на рис. 13.14. Линейный узел *ЛУ* демодулирует радиоимпульсы,

принимаемые из канала связи, формирует и восстанавливает последовательность кодовых видеоимпульсов, которые могут быть искажены помехами. Он осуществляет поэлементный прием импульсов. С выхода преобразователя последовательного кода в параллельный *Пс—Пр* подается комбинация параллельного кода на вход узла защиты кодов *УЗК*, который проверяет коды и запрещает

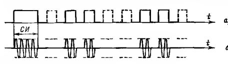


Рис. 13.13. Пример временных диаграмм кодо-импульсных видео- (*а*) и радиоимпульсных сигналов (*б*).

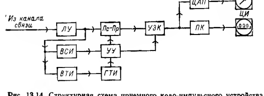


Рис. 13.14. Структурная схема приемного кодо-импульсного устройства.

прохождение или выдает на свой выход принятую информационную кодовую комбинацию. Цифро-аналоговый преобразователь *ЦАП* преобразует информационную кодовую комбинацию в ток или напряжение, подаваемые на выходной аналоговый прибор *ВП*. В преобразователе кодов *ПК* код, принятый из канала связи, преобразуется в код, поступающий на цифровой индикатор *ЦИ* (десятичный или другой) или цифропечатающую машинку.

Последовательность действии узлов (алгоритм) задается управляющим узлом *УУ*, а скорость работы (частота импульсов) — генератором тактовых импульсов *ГТИ*. В отличие от передающего устройства здесь *ГТИ* работает неавтономно, а синхронизируется и сфазируется тактовы-

ми импульсами, подаваемыми с выхода выделителя тактовых импульсов *ВТИ*. Реализация алгоритма приема кодовых комбинаций, задаваемого узлом *УУ*, начинается после приема синхронизирующего сигнала, подаваемого на вход управляющего узла *УУ* с выхода выделителя синхроимпульса *ВСИ* (цикловая синхронизация).

В качестве примера рассмотрим кодо-импульсное устройство, разработанное в ЦНИИКА. На его вход с первичного преобразователя подается напряжение, номинальное значение которого равно 250 мВ при сопротивлении около 500 Ом.

Для упрощения декодирующих устройств выбран двоично-десятичный код. Число уровней квантования $q=100$, что соответствует двум декадам и погрешности отсчета уровней $\pm 0,5$ %. Общая погрешность преобразования аналог — код достигает ± 1 % из-за неидеальных характеристик нуль-органа и декодирующего устройства.

Устройство рассчитано на типовой частотно-уплотненный канал связи с полосой 140 Гц (телеграфный). Кодовые импульсы передаются с тактовой частотой 40 Гц. Передача по вызову занимает десять тактов, т. е. 250 мс; за это время передаются две декады двоично-десятичного кода (восемь тактов) и маркерный (синхронизирующий) импульс (два такта). При передаче используется амплитудная манипуляция. Единице в разряде кода соответствует наличие импульса, а нулю — отсутствие. На приемной стороне измеряемая величина воспроизводится в цифровой форме на двух газоразрядных цифровых индикаторах, при этом приемное устройство не вносит дополнительной погрешности.

Структурная схема передающего устройства приведена на рис. 13.15. Напряжение, подаваемое на вход устройства, преобразуется в код развертывающим преобразователем с обратной связью по коду. С момента начала передачи маркерного импульса ступенчато-возрастающее напряжение обратной связи $u_{\text{о.с}}$ подается одновременно с входным напряжением на нуль-орган *НО*, который непосредственно сравнивает эти напряжения с начала $u_x > u_{\text{кв}} = u_{\text{о.с}}$ и импульсы с нуль-органа с постоянной частотой 2,5 кГц поступают на двоично-десятичный счетчик *ПС* через схему разрешения счета *СРС*.

Счетчик *ПС* на триггерах преобразует ступенчато-возрастающую последовательность импульсов (см. рис. 10.6) с частотой ступенек 2,5 кГц в кодовые комбинации двоич-

но-десятичного параллельного кода. Триггеры счетчика, запоминающие комбинации двоично-десятичного кода, управляют декодирующим устройством *ДК*, которое выполнено в виде цифро-аналогового преобразователя цифра — напряжение. На его выходе

$$u_{\text{о.с}} = N\Delta u_{\text{кв}} - E_{\text{см}}, \tag{13.17}$$

где N — число сосчитанных импульсов; $\Delta u_{\text{кв}}$ — шаг квантования по напряжению; $E_{\text{см}} = 3 \div 4$ мВ — постоянное напряжение смещения.

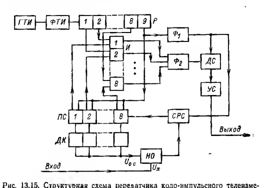


Рис. 13.15. Структурная схема передатчика кодо-импульсного телеизмерительного устройства ЦНИИКА

ГТИ — генератор тактовых импульсов; *ФТИ* — формирователь тактовых импульсов; *Р* — распределитель, *И* — логический элемент совпадений; *ПС* — пересчетная схема (двоично-десятичная); *ДК* — декодирующее устройство; *НО* — нуль-орган; *СРС* — схема разрешения счета; Φ_1, Φ_2 — формирователи импульсов; *ДС* — диодный смеситель; *Ус* — усилитель.

Нуль-орган прекращает выдавать импульсы, как только ступенчато-возрастающее напряжение $u_{\text{о с}}$ становится больше входного напряжения u_x, т. е. когда $u_x \leqslant u_{\text{о.с}}$ или

$$N\Delta u_{\text{кв}} - E_{\text{см}} - u_x \geqslant 0, \tag{13.18}$$

при этом счетчик фиксирует код числа с погрешностью ± 1 % номинального значения u_x.

Процесс кодирования начинается с момента начала передачи маркерного импульса и заканчивается в течение

времени его передачи. Кодовая комбинация хранится в счетчике ΠC до окончания цикла передачи. При этом схема разрешения счета CPC запрещает подачу импульсов с HO на вход ΠC в промежутках между передачами маркерных импульсов, формируемых схемой Φ_1.

Преобразование параллельного кода в последовательный осуществляется с помощью распределителя P, который последовательно опрашивает состояние триггеров схемы ΠC через логические схемы $И$ (каскады совпадения) с частотой 40 Гц, задаваемой генератором тактовых (шаговых) импульсов $ГТИ$. Стабильные по частоте синусоидальные колебания LC-генератора $ГТИ$ преобразуются в импульсные формирователем тактовых (шаговых) импульсов $ФТИ$.

Если в триггере данного разряда записана 1, то его выходное напряжение разрешает соединенной с ним схеме $И$ пропустить на вход формирователя Φ_2 опросный импульс с соответствующей ячейкой распределителя. Схема Φ_2 формирует кодовые импульсы. В диодном смесителе $ДС$ кодовые импульсы суммируются с маркерными и после усилителя $Ус$ поступают в канал связи.

Двоично-десятичный счетчик ΠC выполнен на транзисторах и по сравнению с двоичным имеет дополнительные связи между отдельными триггерами. Четыре триггера, относящихся к одному десятичному разряду, возвращаются в состояние 0 не после фиксации комбинации кода 1111 (т. е. десятичного числа 15), как в двоичном счетчике, а после комбинации 1001 (т. е. числа 9). Этот десятый по счету импульс переводит все четыре триггера первой декады в состояние 0 и поступает также на первый триггер второй декады.

Декодирующее устройство $ДК$ (преобразователь код — напряжение) представляет собой схему суммирования напряжений, создаваемых на цепочке сопротивлений, значения которых подобраны по закону образования двоично-десятичного кода. Для уменьшения зависимости тока каждой ветви от значения напряжения на выходной цепочке сопротивлений включено большое балластное сопротивление. Ветви сопротивлений коммутируются транзисторами, которые управляются триггерами пересчетной схемы. Преобразователь цифра — аналог питается от стабилизированного источника напряжения.

Нуль-орган выполнен на транзисторах и состоит из генератора синусоидальных колебаний, модулятора, импульс-

ного усилителя и выходного амплитудного дискриминатора. Модулятор преобразует входное напряжение постоянного тока в импульсы переменного тока (радиоимпульсы) прямоугольной формы с частотой 2,5 кГц и амплитудой, пропорциональной входному напряжению.

Импульсы после усиления подаются на амплитудный дискриминатор, который перестает пропускать импульсы, если входной сигнал становится меньше порогового уровня. Значение этого порога соизмеримо с шагом дискретности, т. е. достаточно мало. Поэтому нет необходимости точно

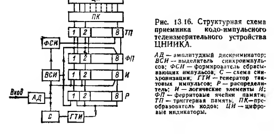


Рис. 13.16. Структурная схема приемника кодо-импульсного телеизмерительного устройства ЦНИИКА.

АД — амплитудный дискриминатор; *ВСИ* — выделитель синхроимпульсов; *ФСИ* — формирователь сбрасывающих импульсов; *С* — схема синхронизации; *ГТИ* — генератор тактовых импульсов; *Р* — распределитель; *И* — логические элементы *И*; *ФП* — ферритовые ячейки памяти; *ТП* — триггерная память; *ПК* — преобразователь кодов; *ЦИ* — цифровые индикаторы.

поддерживать коэффициент усиления и порог срабатывания амплитудного дискриминатора.

Распределитель выполнен на феррит-транзисторных ячейках, включенных по однотактной схеме. Транзистор ячейки выполняет функции вентильного элемента, реагирующего на полярность импульсов в обмотке ферритового кольца, т. е. на направление перемагничивания, а также функции усилителя мощности выходных импульсов. Он форсирует перемагничивание ферритового кольца за счет положительной обратной связи. Распределитель имеет пусковое устройство, исключающее возможность продвижения нескольких единиц по распределителю. Схемы совпадения—диодные. Формирователи кодовых и маркерных (синхронизирующих) импульсов представляют собой одновибраторы на транзисторах.

Приемное устройство (рис. 13.16) преобразует принимаемый код из последовательного в параллельный и после

окончания кодовой комбинации воспроизводит его на цифровых индикаторах. Амплитудный дискриминатор *АД*, выполненный в виде триггера Шмитта, формирует маркерные и кодовые импульсы, т. е. осуществляется поэлементный прием. Схема синхронизации *С* реагирует на передние фронты импульсов и осуществляет синфазирование генератора тактовых (шаговых) импульсов *ГТИ*. Генератором *ГТИ* служит мультивибратор на транзисторах с собственной частотой, несколько меньшей тактовой частоты 40 Гц.

С выхода *АД* импульсы одновременно подаются на выделитель синхронизирующего импульса *ВСИ* и на схемы совпадения *И*. Для выделения схемой *ВСИ* удлиненного синхронизирующего импульса длительность импульса преобразуется в пропорциональное ей напряжение на накопительном конденсаторе, а затем производится дискриминация импульса по уровню триггером Шмитта.

Синхронизирующий импульс вызывает запуск однотактного феррит-транзисторного распределителя *Р*, не замкнутого в кольцо. Распределитель *Р* с тактовой частотой генератора *ГТИ* последовательно опрашивает схемы совпадения *И*. При каждом совпадении на соответствующей схеме *И* импульса, принимаемого из канала связи, и импульса от распределителя *Р* в ферритовой ячейке памяти *ФП* данного разряда записывается 1.

В конце цикла производится считывание кодовой комбинации с ферритовой памяти *ФП* импульсом, поступающим с выхода различителя синхронизирующего импульса *ВСИ*. При этом кодовая комбинация переносится параллельно в триггерную память *ТП*. За 1—2 мс до начала ввода новой кодовой комбинации ранее записанная комбинация на триггерах стирается импульсом с формирователя сбрасывающих импульсов *ФСИ*.

Триггеры *ТП* выполнены на транзисторах, в коллекторы которых включены обмотки электромагнитных реле преобразователя кодов *ПК*. Преобразователь кодов *ПК* преобразует двоично-десятичный код в единично-десятичный (число-импульсный десятичный), необходимый при использовании газоразрядных цифровых индикаторов *ЦИ*. За короткий промежуток времени, в течение которого производится стирание старой комбинации кода и введение новой, электромагнитные реле не успевают сработать, если разряд кода сохранил прежнее значение. В результате этого уменьшается мигание цифр на индикаторе.

В многоканальных кодо-импульсных устройствах используются многие функциональные узлы одноканальных устройств телеизмерений. В отличие от одноканальных в них добавляются синхронно и синфазно работающие коммутаторы в передающем и приемном устройствах, если

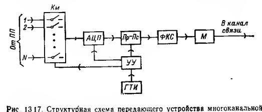


Рис. 13.17. Структурная схема передающего устройства многоканальной кодо-импульсной циклической системы.

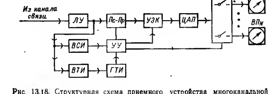


Рис. 13.18. Структурная схема приемного устройства многоканальной кодо-импульсной циклической системы.

применяется временное циклическое разделение каналов телеизмерений. Обобщенные структурные схемы передающего и приемного устройств такой многоканальной циклической системы телеизмерений с временным разделением каналов приведены соответственно на рис. 13.17 и 13.18. В передающем устройстве (рис. 13.17) добавляется коммутатор *К* и соответственно усложняется алгоритм управляющего узла ***УУ***, который управляет и работой коммутатора. Последний поочередно подключает первичные преобразователи к ***АЦП***.

В приемном устройстве на рис. 13.18, если на выходах включены аналоговые выходные приборы *ВП*, функционирование узлов, показанных на рис. 13.14, в основном такое же. Исключение составляет управляющий узел *УУ*, для которого усложняется алгоритм. Коммутатор *Км* поочередно подключает *ЦАП* к выходным аналоговым приборам синхронно и синфазно с работой коммутатора *Км* на передающей стороне с постоянной частотой циклов и тактов.

Многоканальные циклические телеизмерительные системы с временным разделением каналов применялись в радиотелеметрии и промышленной телемеханике. Одинаковые с одноканальными и сравнительно сложные преобразователи в передающем и приемном устройствах здесь использовались поочередно для всех N каналов, что резко снижало стоимость аппаратуры на один канал телеизмерений.

Использовались и другие структурные схемы приемного устройства с цифровым отображением информации и несколько отличным включением коммутатора. Однако все эти схемы не позволяли повысить эффективность передачи, т. е. сократить полосу частот, занимаемую в канале связи, путем уменьшения избыточности передаваемых сообщений ТИ.

Только переход на кодовое разделение каналов (адресные передачи), описанное в гл. 1 и 5, позволил значительно повысить эффективность передачи, т. е. резко сократить полосу частот в канале связи, которая является наиболее дефицитной и дорогостоящей.

Упрощенная структурная схема передающего устройства многоканальной кодо-импульсной системы с временным кодовым разделением каналов телеизмерений приведена на рис. 13.19.

В ней в отличие от схемы на рис. 13.17 применяются разностно-дискретная модуляция (РДМ) и Δ-демодуляция или первичные преобразователи имеют память и, например, не выдают сигнал на свои выходы, если измеряемая величина не изменилась больше чем на заданное значение, т. е. если нет информации (новой). В отличие от схемы на рис. 13.17 электронный коммутатор *Км* имеет не стабильную скорость переключения, а переменную, резко возрастающую при отсутствии передаваемой информации.

Рассмотрим работу схемы на рис. 13.19. Каналы телеизмерений опрашиваются коммутатором *Км* поочередно. Если при опросе i-го канала есть сигнал с i-го первичного

преобразователя, то узел формирователя адреса *ФА* передает кодовую комбинацию адреса i-го канала, а аналого-цифровой преобразователь выдает кодовую комбинацию значения измеряемой величины i-го канала (текст i-го канала). Параллельно-последовательный преобразователь

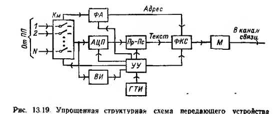


Рис. 13.19. Упрощенная структурная схема передающего устройства многоканальной кодо-импульсной системы ТИ с временным кодовым разделением каналов.

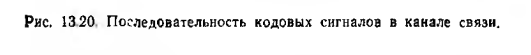


Рис. 13.20. Последовательность кодовых сигналов в канале связи.

Пр—Пс выдает кодовую комбинацию текста в последовательном коде, а формирователь кодовых сигналов *ФКС* сначала передает на модулятор *М* кодовую комбинацию адреса, а затем — кодовую комбинацию текста (рис. 13.20) и вырабатывает дополнительные импульсы, соответствующие контрольным разрядам принятого помехоустойчивого кодв. Модулятор *М* согласует по частоте сигнал с каналом связи. После окончания передачи текста i-го канала коммутатор *Км* подключает $(i+1)$-й канал телеизмерений и, если этот канал имеет информацию (новую), процесс формирования кодовых сигналов осуществляется аналогично, при этом передаются адрес и текст $(i+1)$-го канала. Если выходной сигнал $(i+1)$-го первичного преобразователя отсутствует, то узел выявления информации *ВИ* вырабатывает и передает на вход управляющего узла *УУ* сигнал о более быстром переключении электронного коммутатора *Км* на последующий $(i+2)$-й канал и т. д. Адрес и текст с но-

вой информацией вырабатывается соответственно в кодовой форме узлами *ФА* и *АЦП*. Как следует из рис. 13.19, последовательность действий узлов, задаваемая управляющим узлом *УУ*, здесь усложняется по сравнению со схемой на рис. 13.17. Значительно усложняется функционирование и возрастает быстродействие электронного коммутатора.

Упрощенная структурная схема приемного устройства многоканальной кодо-импульсной системы с временным кодовым разделением каналов приведена на рис. 13.21. Линейный узел *ЛУ* демодулирует сигнал, приходящий из канала связи, и осуществляет поэлементный прием импульсов.

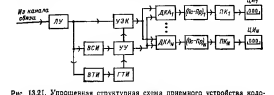


Рис. 13.21. Упрощенная структурная схема приемного устройства кодо-импульсной системы ТИ с временным кодовым разделением сигналов.

ЛУ — линейный усилитель; *ВТИ* — выделитель тактовых импульсов; *ГТИ* — генератор тактовых импульсов; *УУ* — управляющее устройство; *УЗК* — узел защиты кодов; $ДКА_1$—$ДКА_N$ — декодирующие узлы адреса; *Пс—Пр* — преобразователь последовательного кода в параллельный; $ПК_1$—$ПК_N$ — преобразователи кодов; *ЦИ* — цифровой индикатор

Узел защиты кодов *УЗК* пропускает на свой выход разрешенные кодовые комбинации и не пропускает запрещенные кодовые комбинации применяемого помехоустойчивого кода. Разрешенные кодовые комбинации импульсов, состоящие из адресов и текстов (см. рис. 13.20) в виде последовательного кода, подаются, например, одновременно на все декодирующие узлы адреса $ДКА_1$—$ДКА_N$ (рис. 13.21). Узлы $ДКА_1$—$ДКА_N$ пропускают на выход текст, если кодовая комбинация передаваемого адреса соответствует комбинации, присвоенной данному узлу ДКА.

На рис. 13.21 для наглядности представлена упрощенная структурная схема с индивидуальными канальными декодирующими узлами адреса $ДКА_1$—$ДКА_N$. В реальных устройствах широко применяется один общий декодирующий узел адреса с *N* адресными выходами, сигналы с вы-

ходов которого подаются на индивидуальные канальные каскады совпадения (логические элементы $И_1—И_N$) (рис. 13.22). На второй вход элементов $И_1—И_N$ параллельно подаются выходные сигналы с узла *УЗК*. Для пропускания текста данного канала с выхода *ДКА* подаются удлиненные импульсы. В каждом индивидуальном канале на выходе элемента $И_1—И_N$ (рис. 13.22) последовательный код

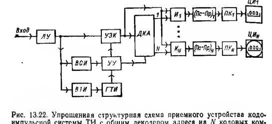


Рис. 13.22. Упрощенная структурная схема приемного устройства кодоимпульсной системы ТИ с общим декодером адреса на N кодовых комбинаций, передаваемых на индивидуальные выходы.

текста, например, преобразуется в параллельный в узлах $(Пс—Пр)_1—(Пс—Пр)_N$ и затем в узлах $ПК_1—ПК_N$ в код, соответствующий коду цифровых индикаторов $ЦИ_1—ЦИ_N$ (десятичный или другой). Последовательностью действия узлов управляет узел *УУ*, скорость работы которого (частота) задается генератором тактовых импульсов *ГТИ*. Генераторы тактовых импульсов *ГТИ* в приемном и передающем устройствах работают синхронно и синфазно. В приемном устройстве *ГТИ* синхронизируется тактовыми импульсами, подаваемыми от выделителя тактовых импульсов *ВТИ*. С этой целью *ВТИ* обычно пропускает передний фронт принимаемых импульсов.

Таким образом, для к о д о в о г о р а з д е л е н и я каналов характерно применение в передающем устройстве коммутатора, частота переключения которого зависит от наличия передаваемой информации в каналах. Разделение каналов в приемном устройстве осуществляется декодирующим узлом адресов с канальными выходами, осуществляющими распределение канальных текстов с помощью логических элементов И. Переход к кодовому разделению ка-

налов в промышленной телемеханике позволяет сократить полосу частот канала связи по меньшей мере в несколько раз.

Рассмотрим некоторые примеры систем.

Многоканальная кодо-импульсная система телеизмерений и телесигнализации ТИ—ТС типа МИКС-1 с временным разделением каналов разработана в ЦНИИКА для диспетчерской службы энергосистем, энергообъединений и других крупных производственных комплексов. Она характеризуется следующими данными: имеет семь рабочих каналов и один канал для передачи синхронизирующего импульса. Каждый рабочий канал может служить для передачи следующей информации ТИ и ТС:

а) одного параметра телеизмерения двоично-десятичным кодом (две группы двоичного кода с весами разрядов *8—4—2—1*) с погрешностью телепередачи при цифровом воспроизведении 1,5 %, при аналоговом 2,5 % (входной ток от первичных преобразователей ТИ $I_{вх} \geqslant 1$ мА, $R_{вх} = 3$ кОм);

б) положения семи двухпозиционных объектов телесигнализации, которые передаются циклически распределительным методом.

Подцикл передачи каждого канала (в том числе и синхронизирующего) состоит из десяти разрядов (элементов). Восемь разрядов служат для передачи информации ТИ или ТС, девятый — для передачи дополнительного защитного импульса (дополняющего общее число импульсов в рабочем канале до нечетного числа) и десятый — для передачи разделительной паузы между каналами. Общее число разрядов в полном цикле равно $10 \cdot 8 = 80$.

Длительность полного цикла при скорости передачи импульсов 50 Бод, заданной по техническим требованиям для каналов связи в энергетике, составляет 1,6 с, а при скорости 75 Бод — 1 с.

Система рассчитана на канал связи типа тонального телеграфирования с полосой пропускания 120 Гц. Предусмотрена плавная регулировка скорости передачи от 10 до 90 Бод.

При телеизмерении производится пропорциональное преобразование напряжения на входе передатчика в каждом канале ТИ в длительность импульса время-импульсного преобразователя, разработанного в ЦНИИКА. Временной интервал преобразуется в код путем счета импульсов. Для этого ток измеряемой величины от первичных преобразова-

телей $ПП_1$, $ПП_3$, $ПП_5$ и $Д_7$ поступает (рис. 13.23) на индивидуальные время-импульсные преобразователи $ВИП_1$, $ВИП_3$, $ВИП_5$ и $ВИП_7$. При переключении каналов распределителем, выполненным в виде двоичного счетчика с матричным дешифратором, происходит поочередный запуск соответствующего ВИП. Модулированный по длительности импульс с выходов $ВИП_1$, $ВИП_3$, $ВИП_5$, $ВИП_7$ через схему

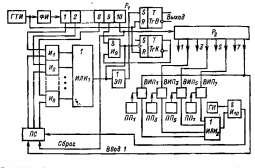


Рис. 13.23. Структурная схема передатчика многоканального устройства ТИ — ТС типа МИКС-1.

$ИЛИ_2$ открывает элемент $И_{10}$, на второй вход которого непрерывно подаются импульсы стабильной частоты $f = 20$ кГц от генератора $ГИ$. Число импульсов этого генератора за время импульса T, подаваемого с $ВИП_1$, $ВИП_3$, $ВИП_5$, $ВИП_7$, подсчитывается пересчетной схемой $ПС$ в двоично-десятичном коде. Максимальная длительность импульса с ВИП $T_{max} = 10$ мс; минимальная длительность, соответствующая нулевому значению измеряемой величины, $T_{min} = 2$ мс. Следовательно, за время $t = T_{max} - T_{min} = 8$ мс подается 160 импульсов.

На следующих тактах (до восьмого) распределитель импульсов P_1 через элементы $И_1$, ..., $И_8$ опрашивает состояние триггеров пересчетной схемы, начиная с наиболее «весомого» триггера $2^3 \cdot 10$. При этом, если триггер находится в состоянии 1, элемент $И_1$, ..., $И_8$ через $ИЛИ_1$ и эмиттерный

повторитель *ЭП* перебрасывает выходной триггер *ТгВ*, выдавая импульс в канал связи. Перед каждым тактом распределителя P_1 выходной триггер *ТгВ* сбрасывается генератором *ГТИ*. В линии при этом формируются импульсы со скважностью $Q = 1000$. Паузу между следующими подряд один за другими импульсами можно наблюдать только на активной нагрузке триггера *ТгВ*.

Импульсы с выхода *ИЛИ*$_1$ поступают на счетный вход триггера контроля кода *ТгК*. Если число импульсов четное, то этот триггер выдает через элемент *И*$_9$ дополнительный импульс на вход *ЭП* и триггер *ТгВ* и образует нечетное число импульсов за один подцикл. Триггеры *ТгК*, *ТгВ* и пересчетная схема *ПС* возвращаются в исходное состояние на десятом такте распределителя P_1. Одновременно с этим распределитель P_2 переключает канал.

Синфазирование работы передатчика и приемника осуществляется при передаче специальной кодовой комбинации, состоящей из девяти следующих подряд импульсов (без паузы) путем ввода 1 в триггеры *ПС* на восьмом синхронизирующем канале распределителя P_2. Такая кодовая комбинация нормально не может возникнуть при передаче сигналов ТИ и ТС.

Для передачи сигналов ТС в схеме на рис. 13.23 служат каналы *1*, *3*, *5* и *7* распределителя P_2 (цепи ТС на рисунке не показаны).

В течение всего подцикла передачи сигналов ТС все триггеры пересчетной схемы устанавливаются в состояние 1. Передача импульсов от первичных преобразователей ТС производится на тактах 1, ..., 8 распределителя P_1. Амплитуда импульса зависит от состояния контакта первичного преобразователя ТС. Замкнутому контакту первичного преобразователя ТС соответствует пауза на данном такте распределителя P_1. На пятом такте образуется постоянная пауза. Это исключает образование удлиненного импульса при передаче разомкнутого состояния всех первичных преобразователей ТС. Статистическая информация (ПД) передается аналогично.

В приемнике системы МИКС-1 (рис. 13.24) линейный блок *ЛБ* состоит из входного усилителя-ограничителя, интегрирующего звена, формирователя импульсов и инвертора. Применение схемы с интегрирующим звеном повышает помехоустойчивость приемника (рис. 13.25). Для восстановления импульсов принимаемого кода выходные сигналы *ЛБ* и *ГТИ* подаются на элемент *И*$_2$. В отличие от этого

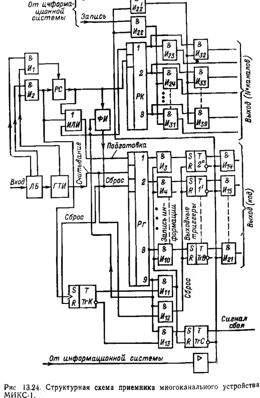


Рис 13.24. Структурная схема приемника многоканального устройства МИКС-1.

выходные импульсы элемента $И_1$ фиксируют число периодов генератора *ГТИ* в паузах и представляют собой инверсный код.

Генератор тактовых импульсов *ГТИ* в приемном устройстве синхронизируется пошаговым способом, т. е. корректируется на каждом принятом импульсе. Требуемая стабильность частоты генератора *ГТИ* составляет примерно 2—3 % и определяется максимальной длительностью пау-

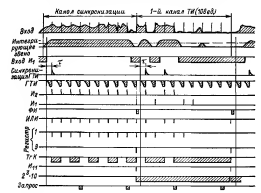


Рис. 13 25. Временные диаграммы сигналов в приемнике МИКС-1.

зы между синхронизирующими импульсами, подаваемыми на вход *ГТИ* (17 тактов).

Синфазность работы приемника осуществляется путем передачи синхронизирующей кодовой комбинации, состоящей из девяти следующих подряд импульсов (в виде удлиненного импульса). Для выделения этого импульса используется различитель синхроимпульса *РС*, выполненный в виде счетной схемы на триггерах. Применение счетной схемы упрощает требования к стабильности элементов и позволяет в широких пределах изменять скорость передачи путем изменения тактовой частоты в передатчике и приемнике.

При приеме синхронизирующей кодовой комбинации различитель синхроимпульса *РС* на следующем такте *ГТИ* сбрасывает распределитель каналов *РК*, очищает регистр *Рг* и подготовляет его входную ячейку. С этого момента начинается новый цикл приема информации.

Генератор тактовых импульсов *ГТИ* продвигает контрольный разряд 1 и вслед за ним все введенные элементом $И_2$ разрядные импульсы информации по ячейкам двухтактного регистра *Рг* до момента, пока контрольный разряд 1 не достигнет девятой ячейки. Этот момент соответствует окончанию передачи информации одного канала. Выходной импульс девятой ячейки переключает распределитель каналов, подготавливает входную ячейку регистра для нового цикла движения контрольного разряда (1) по регистру, через элемент $И_{12}$ производит сброс старой информации на выходных триггерах *ТгВ*. Через элементы $И_{11}$ и $И_3$, ..., $И_{10}$ записывается новая информация на триггерах *ТгВ*, если информация принята правильно.

Контроль правильного приема информации осуществляется с помощью триггера контроля *ТгК*. Если триггер *ТгК* принял неправильное (четное) число импульсов, то включается триггер сигнала сбоя *ТгС*.

Вывод информации с распределителя каналов *РК* и выходных триггеров может осуществляться по запросу информационной системы или непрерывно. Выход *РК*, выполненного в виде пересчетной схемы и матричного дешифратора, разделен на два такта: сначала при запросе выдается импульс сброса (0,5 мс), а затем импульс записи данного канала (0,5 мс). Информация с выходных триггеров выдается по запросу в течение 1 мс. Сброс регистра в начальное положение производится импульсом от схемы *ФИ*.

Вывод информации с данного приемника на индивидуальные блоки воспроизведения и преобразования информации, такие, как блок сигнализации и цифро-аналоговые преобразователи, может осуществляться также без схемы разрешения выхода (выходы $2^{\circ}\cdot 10$, ..., $2^3\cdot 10$).

В блоке сигнализации кодовые комбинации запоминаются на триггерах. Выходными элементами служат герметизированные реле РМУГ, которые позволяют избежать перерыва подачи питающего напряжения на сигнальные лампы при восстановлении информации на триггерах. Контакты реле используются в схемах световой сигнализации и цифровой печати.

В цифро-аналоговом преобразователе весовые сопротивления переключаются полупроводниковыми триодами, работающими в ключевом режиме, а кодовые комбинации запоминаются на триггерах.

13.4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ ТИ

Дадим сравнительную оценку принципов построения устройств телеизмерений по нескольким наиболее важным критериям. Отказ от выбора единого, экономического критерия вызван тем, что существующие системы телеизмерений предназначены для различных целей, построены по различным трудносопоставимым требованиям и используют различную трудносопоставимую элементную базу.

Необходимо учитывать, что сравнительная оценка систем в известной мере имеет условный характер, однако она соответствует историческому процессу развития систем телеизмерений. При этом новые, практически непрогнозируемые идеи и методы могут вызвать некоторую переоценку ценностей и некоторое изменение в оценке систем телеизмерений. Тем не менее приводимая оценка позволяет лучше охарактеризовать системы и может содействовать возникновению новых идей и методов телеизмерений.

Для оценки принципов построения выберем следующие наиболее важные критерии оценки: реально достижимая минимальная погрешность телеизмерений, помехоустойчивость, надежность системы, возможность работы с различными каналами связи, стоимость системы ТИ и возможность унификации и массового производства унифицированных устройств.

Среди перечисленных критериев нет такого показателя, как быстродействие, так как для промышленных систем телеизмерений допустимо быстродействие телеизмерений около 3—5 с. Такое быстродействие реализуется простыми средствами для всех рассматриваемых принципов построения. Для оценки принципов построения систем телеизмерений выберем наиболее наглядный с п о с о б с о с т я з а н и й, заключающийся в присвоении каждому принципу построения занимаемого места по данному критерию, начиная с первого (высшего).

В табл. 13.1 дана такая сравнительная оценка четырех рассмотренных принципов построения устройств телеизмерений с учетом перехода на интегральные микросхемы. Кодо-импульсные устройства имеют значительно лучшие пер-

Таблица 131

Критерий оценки	Номер места системы			
	интенсивности	время-импульсной	частотной	кодо-импульсной
Минимально достижимая погрешность	4	2—3	2—3	1
Помехоустойчивость	4	3—2	3—2	1
Надежность	$^4/_1$	$^2/_1$	$^3/_3$	$^1/_4$
Возможность работы с различными каналами связи	4	2	3	1
Стоимость	$^4/_1$	$^2/_3$	$^3/_3$	$^1/_4$
Возможность унификации и массового производства	4	2	3	1

спективы внедрения и показатели по надежности и стоимости аппаратуры.

В строках «Стоимость» и «Надежность» устройств в числителе дано место при повышенных требованиях к точности и помехоустойчивости (например, при погрешности $\delta \leqslant 1$ %), а в знаменателе — без повышенных требований.

Для многоканальных телеизмерений дополнительная стоимость и дополнительная более сложная аппаратура в кодово-импульсных устройствах раскладываются на все каналы телеизмерений, поэтому в многоканальных ТИ кодо-импульсные устройства имеют неоспоримые преимущества по сравнению с другими системами.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ПРИНЦИПЫ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕСИГНАЛИЗАЦИИ

14.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Телеуправлением называется передача на расстояние с помощью канала связи команд, воздействующих на исполнительные органы управляемого объекта.

Назначением устройств телеуправления является автоматическая передача команд с ПУ объектам на КП через канал связи, при этом в большинстве случаев практически не допустимы ложные команды (искажение команд). Высокие требования по достоверности сигналов ТУ—ТС

приведены в табл. 5.1. Достоверность передачи резко повышается автоматическим квитированием команды средствами телесигнализации (ТС) с КП.

Телеуправление относится к наиболее ответственным операциям в телемеханике, практически не допускающим ложных команд, так как исполнение команд на КП происходит автоматически, без участия человека. Поэтому для ответственных объектов, например, в энергетике [44] к ТУ предъявляются следующие требования.

1. Операция ТУ обязательно должна сопровождаться ответной телесигнализацией, которая используется для контроля правильности выполнения операции ТУ. Система, объединяющая функции ТУ и ТС, является комбинированной системой ТУ—ТС.

2. Посылка приказа ТУ должна состоять как минимум из двух операций: подготовительной (выбор объекта и характера операции) и исполнительной (запуск передачи). При таком разделении уменьшается вероятность неправильных действий диспетчера. После подготовительной операции диспетчер может проконтролировать свои действия по сигналам на мнемосхеме пульта управления. Наиболее радикальным решением, обеспечивающим правильность посылки и исполнения приказа, является подтверждение приема подготовительной операции на КП с помощью посылки ответного сигнала по каналу ТС. После сверки на ДП посланной и подтвержденной подготовительной операции посылается на КП исполнительный приказ.

3. Любое одно- или двукратное искажение сигнала при ТУ или повреждение любого одного элемента должно сопровождаться защитным отказом, т. е. при этом не допускается исполнение ложных приказов.

4. Исполнение приказов не должно происходить при повреждении канала связи в спокойном состоянии системы или в процессе передачи.

5. Выход из строя канала связи, а также потеря питания полукомплектов системы не должны приводить к ложным приказам и должны сигнализироваться на ДП; канал связи должен непрерывно контролироваться.

6. Посылка приказов ТУ должна производиться методом спорадической передачи; передача ответной телесигнализации допускается как спорадическим, так и циклическим методами.

7. В случае нарушения приема известительной ТС на ДП схема должна обеспечивать повторные передачи с КП

на ДП до тех пор, пока эти сигналы не будут сквитированы дежурным персоналом ДП.

8. Приказы ТУ, не выполненные по каким-либо причинам, не должны запоминаться на КП. Для их выполнения необходим повторный запуск устройства с ДП.

9. Должно быть предусмотрено предпочтение известительной ТС перед посылкой приказа ТУ.

10. Сигналы, возникающие на КП во время повреждения устройства либо канала связи при передаче других сигналов должны запоминаться и затем при ликвидации повреждений либо окончании передачи других сигналов автоматически передаваться на ДП.

11. Приход каждого известительного сигнала на ДП должен сопровождаться общим вызывным сигналом (звуковым или световым), квитируемым вручную.

12. Одна исполнительная операция ТУ предназначена, как правило, для одного объекта управления. Фиксация приема только одного приказа является дополнительной гарантией его правильности. В отдельных, особых случаях схема должна допускать возможность циркулярного управления, т. е. передачу приказов нескольким объектам одной исполнительной операцией ТУ.

Телесигнализацией называется передача на расстояние дискретных сигналов о положении или состоянии контролируемых объектов.

В связи с этим устройства телеуправления обычно совмещаются с устройствами телесигнализации и называются устройствами ТУ—ТС. К исключениям относятся, например, устройства телеуправления строительными и другими кранами со зрительным контролем, заменяющим ТС и системы циркулярной передачей команд объектам по силовой сети, в которых трудно осуществить ТС.

При телеуправлении промышленными объектами во многих случаях передаются простейшие двухпозиционные дискретные команды типа «включить», «выключить» либо «прибавить», «убавить» (давление, расход, напряжение, уровень и т. п.). Такие же простейшие сигналы передаются при телесигнализации, например «включен» или «отключен» («выключен») данный объект. Максимальное время передачи сигналов ТУ—ТС в промышленной телемеханике в подавляющем большинстве допустимо около нескольких секунд.

Из экономических соображений нецелесообразно занимать дорогостоящий канал связи для передачи только од-

ного сигнала, например «включить» или «выключить», тем более что часто с пункта управления необходимо передавать значительное число команд нескольким или многим объектам управления. Поэтому для эффективного использования канала передают команды телеуправления для многих двухпозиционных объектов через общий канал связи одним общим устройством ТУ—ТС.

Для повышения достоверности передачу команды телеуправления одному из многих объектов разделяют на несколько этапов, например:

1) автоматическое избирание заданного объекта телеуправления путем передачи через канал связи сигнала «избирание» данного объекта. Эта операция называется подготовительной;

2) автоматическое подтверждение на ПУ переданного сигнала путем приема сигналов телесигнализации;

3) передача выбранному объекту исполнительной команды «включить» или «выключить» после подтверждения его избирания.

Для уменьшения вероятности возникновения ложных команд одновременно передается только одна команда избирания данного объекта. Так же передается одна исполнительная команда, при этом несколько команд вызывают защитный отказ. Вероятность ложных команд, как показано в гл. 3 и 5, уменьшается, если на первом этапе подготовительная команда запоминается на КП и с КП на ПУ передается сигнал ТС о принятой подготовительной команде. Только после приема этого ответного (квитирующего) сигнала на ПУ, т. е. после его подтверждения, на третьем этапе с ПУ на КП передается команда об исполнении уже ранее подготовленной команды. В отличие от этого сигналы от различных объектов ТС передаются на КП за один цикл, чтобы убедиться в правильном состоянии всех или ряда объектов телесигнализации.

Многоступенчатость процесса управления осуществляется путем выполнения его за несколько этапов. Это резко уменьшает вероятность неправильной посылки команды оператором или диспетчером из-за его поспешности, рассеянности и т. п. При многоступенчатом управлении оператор может исправлять ошибки, вызванные его неправильными действиями или искажением передаваемых сигналов ТУ—ТС. Достоверность передачи повышается путем применения защит, используемых в телеуп-

равлении, запрещающих дальнейшие действия оператора, если, например, вместо одного объекта произошло избрание нескольких объектов, что автоматически вызывает защитный отказ.

Из сказанного выше следует, что избирание объекта, передача и прием исполнительной команды ТУ — главные функции устройств телеуправления, а передача и прием сигналов телесигнализации — главные функции устройств телесигнализации.

В связи с этим устройства ТУ—ТС и их основные принципы называются по методам передачи и разделения сигналов. В реальных системах редко все сигналы ТУ—ТС передаются одним методом, поэтому устройства называются по преимущественному методу передачи основных сигналов. Так, устройства ТУ—ТС называются многопроводными, частотными, временными, кодовыми и т. п. Последние устройства также получили название цифровых.

Для команд телеуправления характерно значительное разнообразие по виду команд, оперативным и техническим способам их передачи и быстродействию. По виду команды разделяются на следующие:

однокомпозиционные — «включить» или «отключить»;

двухпозиционные — «включить» и «отключить». Однопозиционные и двухпозиционные команды в промышленной телемеханике составляют подавляющее большинство;

двухпозиционные — «прибавить» и «убавить» или трехпозиционные команды — «прибавить», «убавить» и «стоп», воздействующие во многих случаях на уставки автоматических регуляторов и называемые телерегулированием. Для завершения одного процесса телерегулирования может быть необходима передача нескольких таких команд;

многопозиционные — передача значения телеуправляемого параметра в аналоговой или дискретной форме (например, открыть на 35 % затвор ирригационного канала). Передача таких команд получает более широкое применение и осуществляется главным образом путем спорадических адресных передач кодовыми комбинациями, содержащими адрес и текст для объекта управления. Они называются *многопозиционными кодовыми командами* (КК) и относятся также к телерегулированию.

По оперативным способам (режиму) передачи команды разделяются на следующие:

спорадические — команды передаются по мере возникновения необходимости их передачи. Такие команды составляют подавляющее большинство в промышленной телемеханике;

циклического опроса объектов и циклической передачи команд по изменяющейся программе — за период цикла опроса передаются команды только заданным объектам (по программе). Примером таких команд является вызов телеизмерений (ТИ по вызову). Существует тенденция расширения этих команд, так как они проще реализуются в несложных системах;

циклической передачи — отличаются от циклического опроса повторением передачи одной команды в течение ряда циклов до прихода известительных сигналов. Такие команды реализуются в циклических системах с временным разделением сигналов. Каждому сигналу при этом отводится свой временной интервал;

циркулярные — передача одинаковых команд (например, «выключить») всем или нескольким объектам телеуправления. Циркулярные команды передаются при телеуправлении освещением улиц и для различных объектов в системах пожарной и другой сигнализации.

По быстродействию команды и соответственно промышленные устройства ТУ—ТС разделяются на три группы: с временем передачи команды до 1 с — 1-я группа, до 4 с — 2-я группа, более 4 с — 3-я группа.

На ранних этапах развития телемеханики, когда теория телемеханики еще не была развита, применялись самые разнообразные технические способы и методы передачи команд с использованием большого разнообразия методов разделения сигналов, различных кодов, технических средств и т. п. Большинство из этих способов оказались малоэффективными и не удовлетворяющими современным требованиям по унификации, массовому производству и применению в самых разнообразных условиях. В настоящее время все более широко используется кодовое разделение сигналов ТУ (адресные передачи) в виде кодовых комбинаций с адресом и текстом, передаваемых двухпозиционными ($m=2$) помехозащищенными кодами, так как они в большей степени удовлетворяют современным требованиям.

На рис. 14.1 приведена классификация команд телеуправления по их источникам, виду сигналов, достоверности

передачи, оперативным способам передачи, этапам передачи, быстродействию и основным методам разделения сигналов

В устройствах ТУ—ТС применяются следующие виды телесигнализации.

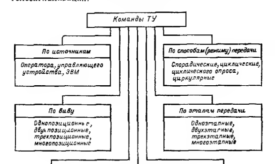


Рис. 14.1. Классификация команд ТУ.

1. О состоянии отдельных объектов и групп объектов типа «включен» или «выключен». Такая сигнализация передает сведения о том, какие объекты включены и какие выключены (отключены) с адресами объектов, и передается она автоматически (например, циклически) или по вызову оператора и ЭВМ.

2. О выходе контролируемых на расстоянии параметров за пределы установленных норм (например, более чем на 5—10 %).

Сигналы о состоянии «в норме», как правило, не передаются. Может передаваться и степень отклонения от нор-

мы в виде предупредительных сигналов и сигналов аварии, а также более детальные дискретные сигналы «выше нормы». Они более подробно описаны в гл. 17.

Сигнализация телеконтроля может передаваться автоматически при ее возникновении или по вызову оператора, при этом аварийные сигналы передаются независимо от действий оператора.

3. Подтверждающая избирание объекта телеуправления и исполнение команды, называемая известительной сигнализацией. Известительная сигнализация передается в ответ на действия оператора или в ответ на сигналы с ЭВМ.

В ответственных и более сложных устройствах ТУ—ТС вся телесигнализация содержит информацию об адресе объекта. Однако для массовых рассредоточенных объектов, например на нефтепромыслах, трубопроводах, в ирригации, команда ТУ во многих случаях подтверждается общим сигналом для группы объектов, т. е. известительная телесигнализация может быть безадресной. Это допустимо лишь в том случае, если приняты достаточные меры для предотвращения ложных сигналов.

В отличие от передач в телеграфной, телефонной и другой связи, где допускаются примерно равные вероятности подавления и возникновения ложного сигнала, в телемеханике возникновение ложной команды недопустимо и может сопровождаться тяжелыми последствиями. В связи с этим в телемеханике предъявляются высокие требования к уменьшению вероятности появления ложных команд и невысокие требования к вероятности подавления сигналов, так как при подавлении команды и применении обратного канала используются защитные отказы с повторением передачи.

Телеуправление объектами может выполняться по типовым программам. Для облегчения работы оператора при этом на ПУ применяются специальные устройства автоматического опроса объектов и передачи команд по заданным программам или команды вырабатывает ЭВМ. Функции оператора при этом сводятся к выбору программы и к операциям, требующим более сложных решений. В современных системах с большим объемом информации, обрабатываемой на ПУ, широко применяются ЭВМ, а система ТУ—ТС осуществляет обмен информацией между машиной и объектами, т. е. автоматическую связь между машиной и объектами на расстоянии.

Многоканальной называется передача, в которой каждому объекту (источнику) выделен индивидуальный канал с временным или частотным разделением. При адресной передаче выделяется индивидуальный адрес, при комбинированной используется адресно-многоканальная передача.

На первых этапах развития телемеханики создавались системы ТУ—ТС для объектов, сосредоточенных на одном

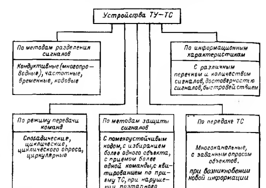


Рис. 14.2. Классификация устройств ТУ — ТС.

контролируемом пункте (работа пункт — пункт). В дальнейшем для повышения эффективности канала связи оказалось целесообразным создавать также системы ТУ—ТС для объектов, рассредоточенных по линии или каналу связи любой конфигурации.

Системой ТУ—ТС для рассредоточенных объектов называется система с несколькими контролируемыми пунктами, рассредоточенными по общей линии или каналу связи любой конфигурации. Создание систем ТУ—ТС для рассредоточенных объектов (нефтедобыча, трубопроводы, ирригация и др.) потребовало развития специальных методов и технических средств телемеханики.

На основании изложенного выше в системах ТУ—ТС по сравнению с системами телеизмерения применяется значительно большее разнообразие методов, режимов передачи и способов защиты сигналов ТУ и ТС. Здесь также значительно больше показателей для классификации систем (см. рис. 14.1 и 14.2).

На рис. 14.2 приведена упрощенная классификация систем ТУ—ТС по важнейшим показателям, таким, как методы разделения сигналов, режимы передачи, методы защиты и др. Заметим, что классификация является упрощенной и условной. Она не может охватить все многообразие реальных систем. Описываемая классификация относится к передаче как сигналов ТУ, так и ТС, которые могут быть разными.

Для сокращения числа каналов связи широко применяются многофункциональные (комплексные) системы телемеханики, в которых устройства ТУ—ТС объединяются с устройствами телеизмерений и передачи данных. Это часто дает значительный экономический эффект за счет сокращения дорогостоящих каналов связи.

В промышленной телемеханике из числа бесконтактных более широко применяются следующие группы устройств ТУ—ТС, выпускаемых или выпускавшихся промышленностью:

1) многопроводные при сравнительно небольшой протяженности многожильных кабельных линий связи (до 2—5 км) для рассредоточенных объектов;

2) частотные со спорадической передачей с избиранием объекта или КП одной из n частот (код C_n^1) или двумя параллельно или последовательно передаваемыми частотами из числа n частот (код C_n^2 или A_n^2) для некрупных рассредоточенных объектов;

3) циклические с временны́м разделением элементов сигналов с кодом для передачи команд на сочетание C_n^1 для объектов, сосредоточенных на одном КП (работа пункт — пункт);

4) цифровые (кодовые) со спорадической адресной передачей сигналов ТУ—ТС двухпозиционными помехоустойчивыми кодами, с кодовым разделением сигналов и временны́м разделением элементов сигналов. Такие устройства применяются для сосредоточенных и рассредоточенных КП.

Сравнение способов избирания объектов ТУ при различных возможных методах разделения, рассмотренных в гл. 1, представляет известные трудности из-за многообразия показателей и характеристик. Эти показатели практически невозможно учесть даже по комплексным критериям (различная эффективность и помехоустойчивость при разных помехах и других особенностях передачи, различная возможность увеличения числа сигналов, большая номенклатура элементов и т. п.).

На ранних этапах становления телемеханики развивалась теория избирания объектов телеуправления, которая представляла некоторый интерес при выделенных физических линиях связи и слабой их информационной нагрузке. Рассматривались разнообразные избирающие признаки (полярный, амплитудный, фазовый и др.) и различные способы избирания, такие, как разделительный, частотный, распределительный (временной), частотно-распределительный, разделительно-комбинационный, частотно-комбинационно-распределительный и др. Анализ способов избирания проводился без учета теории помехоустойчивости, тем более при различных видах помех. Эффективность передачи также, по существу, не учитывалась, что недопустимо в современных условиях дефицитности каналов связи. Поэтому в современных устройствах эта теория не получила применения. С основными положениями этой теории можно ознакомиться в более ранних учебных пособиях по телемеханике, например в [39].

В массовых системах ТУ—ТС, выпускавшихся или выпускаемых промышленностью, в подавляющем большинстве случаев используются только три основных способа разделения сигналов: частотный, временной циклический и временной кодовый, описанные в гл. 1.

В ы б о р с п о с о б о в р а з д е л е н и я с и г н а л о в в устройствах ТУ—ТС необходимо производить в соответствии с методами разделения сигналов (г. 1), теорией кодирования (гл. 3), помехоустойчивости и эффективности передачи (гл. 5). Выбор должен подтверждаться расчетами.

С учетом изложенного выше ограничимся рассмотрением только особенностей разделения сигналов ТУ—ТС при частотном, временно́м и кодовом разделении сигналов, тем более что, как отмечалось ранее, существует тенденция перехода к передаче команд телеуправления кодовыми комби-

нациями с адресом и текстом команды. Передача команды во многих случаях осуществляется в несколько этапов, а телесигнализация передается за время передачи команды от многих объектов ТС, например, многоканальным методом с временным разделением сигналов.

Временное разделение сигналов отличается тем, что каждому из N передаваемых сигналов, как говорилось в гл. 1, канал связи предоставляется поочередно (последовательно). В интервал времени T_1 передается первый сигнал, а в интервал времени T_i — i-й сигнал. Следовательно, каждый сигнал имеет присвоенный ему временной интервал, который недопустимо занимать другими сигналами. Разделение сигналов на передающей и приемной сторонах канала связи осуществляется синхронно и синфазно работающими коммутаторами (распределителями), описанными в гл. 9. Для всех систем с временным разделением сигналов обязательна синхронизация работы распределителей, описанная в гл. 1.

В ранних устройствах ТУ—ТС с временным разделением сигналов, построенных на релейно-контактных элементах с ограниченными ресурсами числа замыканий контактов, применялась спорадическая передача всех сигналов ТУ и ТС. После передачи одной подготовительной команды в виде серии импульсов распределительным кодом C_N^1, избирающей выходную цепь объекта, следовала ответная серия импульсов ТС от различных объектов, т. е. осуществлялась многоканальная передача ТС. После этой серии с ПУ передавалась исполнительная команда также с временным разделением сигналов распределительным кодом C_N^1. Время передачи всех сигналов команды составляло десятки секунд. Применялась пошаговая синхронизация распределителей.

С переходом на более надежные бесконтактные элементы релейного действия с неограниченными или очень большими ресурсами срабатывания релейных элементов оказалось целесообразным перейти к циклическому режиму работы устройств ТУ—ТС со стабильной тактовой частотой и стабильным по частоте циклом работы коммутаторов, составляющим доли секунды. В качестве тактовой частоты во многих случаях использовалась общая на передающей и приемной сторонах силовая сеть 50 Гц. Это облегчало синхронизацию распределителей.

За время цикла распределителей в таких устройствах, еще применяемых в народном хозяйстве, передается толь-

ко одна подготовительная команда для избирания выходных цепей объекта. В ответных импульсных сериях с КП в каждом цикле многоканальным методом передается информация о всех ТС. Оператор после подтверждения подготовительной команды передает исполнительную команду. Во всех устройствах с временным разделением используется ряд защит, резко повышающих достоверность передачи команд. Достоверность передачи сигналов ТУ и ТС возрастает при их цикличеcком повторении. Более подробно принципы построения устройств ТУ—ТС с временным разделением сигналов описаны в гл. 15.

Частотное разделение сигналов, как говорилось в гл. 1, отличается тем, что каждому сигналу выделяется своя отдельная частота так, чтобы полосы частот каждого сигнала размещались в неперекрывающихся по частоте участках диапазона частот (см. рис. 1.17).

Максимальная информационная емкость частотных устройств ТУ—ТС для электрических контуров и фильтров ограничивается сравнительно небольшим числом частотных избирателей, размещаемых в рабочем диапазоне частот (например, в телефонном канале), что вызвано трудностями реализации узкополосных избирателей. Поэтому в частотных устройствах ТУ—ТС с относительно большой информационной емкостью каждому сигналу ТУ выделяется не индивидуальная частота, а комбинация нескольких частот, при этом частоты могут передаваться одновременно или поочередно.

При одновременной передаче частот суммарное число сигналов N для n возможных частот и m частот, участвующих в образовании одной кодовой комбинации,

$$N = C_n^m = \frac{n(n-1)\ldots(m+1)}{1\cdot 2\cdot 3\ldots(n-m)}. \quad (14.1)$$

Если в каждой кодовой комбинации участвуют две одновременно передаваемые частоты, то (14.1) упрощается и число сигналов

$$N = C_n^2 = n(n-1)/2. \quad (14.2)$$

При последовательной посылке частот в любой момент времени передается не более одной частоты. Это позволяет уменьшить требования к нелинейным искажениям в канале связи и к аппаратуре до легко достижимого значения. Поэтому более широкое применение получили устройства

ТУ—ТС с последовательной передачей частот. В этом случае

$$N = A_n^m = n!/(n-m)!. \qquad (14.3)$$

Для применяемого кода с избиранием каждого объекта двумя частотами формула (14.3) упрощается:

$$N = A_n^2 = n(n-1). \qquad (14.4)$$

Полоса частот, занимаемая в канале связи, ограничивается в основном селективными свойствами и стабильностью частотных избирателей и генераторов. Широкое применение получили частотные избиратели с электрическими резонансными контурами и полосовыми фильтрами. Для увеличения добротности применяются катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками. Сужение полосы частотных избирателей позволяет экономнее использовать полосу частот в канале связи и повысить помехоустойчивость устройств ТУ—ТС. Поэтому для дальнейшего развития частотных устройств представляют интерес узкополосные электромеханические частотные избиратели и генераторы, а также RC-фильтры и генераторы с гибридной технологией производства (см. § 9.4).

Частотные методы разделения сигналов позволили создать простые частотные избиратели объектов и КП с одним или несколькими электрическими контурами и полосовыми фильтрами, не требующими местных источников питания на КП, что очень важно для массовых объектов управления, рассредоточенных по каналу связи: на трубопроводах, в ирригации, на нефтепромыслах и т. п. В этих отраслях народного хозяйства частотные системы получили массовое применение благодаря возможности создания простых устройств на КП. Принципы построения частотных устройств ТУ—ТС более подробно описаны в гл. 15.

14.3. КОДОВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ

Устройства с временным кодовым разделением сигналов, называемые также цифровыми устройствами, обладают неоспоримыми преимуществами, такими, как более высокая помехоустойчивость, лучшее использование канала связи, большие возможности унификации массового производства и применения в самых разнообразных условиях, несмотря на несколько большее число компонентов (деталей) в системе на один сигнал. Эти преимущества реализу-

ются более эффективно при использовании интегральной элементной базы.

Из-за высокой стоимости и дефицитности каналов связи применяются многофункциональные (комплексные) устройства, передающие не только сигналы ТУ и ТС, но также сигналы телеизмерений и буквенно-цифровой информации (передача данных — ПД). Такие устройства отличаются большой гибкостью применения и высокой эффективностью использования канала связи. Повышение эффективности передачи (см. гл. 5) достигается не только путем использования избыточности различных сигналов ТУ, ТС, ТИ, ПД при одинаковой их срочности передачи (см. гл. 1, 5 и 12), но и путем применения приоритетов в передаче сигналов, описанных в § 18.5.

Учитывая многообразие возможных и используемых принципов построения кодовых (цифровых) устройств, ограничимся изложением обобщенных, упрощенных принципов разделения и передачи кодовых сигналов в многофункциональных устройствах, которые обобщены в результате сравнительного анализа отечественных и иностранных систем телемеханики. Конкретные устройства могут иметь принципы построения, несколько отличные от принципов, описанных в гл. 15.

К кодовым (цифровым) устройствам телемеханики относятся устройства с временным разделением элементов сигнала, двухпозиционными кодами, адресными передачами сигналов ТУ, ТС, ТИ и ПД или с преобладанием адресных передач над многоканальными. Многоканальными методами при этом передаются в основном сигналы ТС. Цифровые многофункциональные устройства ТУ, ТС, ТИ и ПД применяются как для объектов, сосредоточенных на одном КП, так и для объектов, рассредоточенных по каналу связи различной структуры.

Скорость передачи информации в цифровых устройствах может изменяться в широких пределах путем переключения тактовой частоты и ограничивается главным образом полосой частот канала связи. Отметим, что возможность изменения скорости передачи путем изменения тактовой частоты характерна для широкого класса цифровых систем (не только телемеханики). Цифровые устройства телемеханики могут работать по телеграфному и телефонному каналу со скоростью от 50 до 2000—3000 Бод и более. Для одного комплекта отдельные сообщения ТУ, ТС,

ТИ и ПД состоят из одинакового числа импульсов с целью упрощения их защиты от помех и упрощения приемных устройств.

Все элементы сигналов приведены к двум значениям (0 и 1), т. е. применяются двухпозиционные коды. Они передаются через канал связи во *многих* случаях методом частотной модуляции. Предусматривается передача двумя, а в отдельных случаях — и тремя частотами. При двух частотах в канале связи частоте F_0 соответствует 0, а частоте F_1 — 1.

При использовании трех частот каждый элементарный сигнал передается двумя частотами. Для передачи 0 сначала посылается частота F_3, а затем F_0, а для передачи 1 — сначала частота F_1 и затем F_3. Естественно, что для трех частот полоса в канале связи возрастает и используется менее эффективно, но за счет этого повышается помехоустойчивость передачи и упрощается аппаратура приемника. Три частоты применяются в телефонных каналах, а две — в телеграфных.

На диспетчерском пункте информация в цифровой форме отображается на цифровых индикаторах, подается на печатающие машинки и ЭВМ, а в аналоговой форме — на выходные приборы и для записи на самописцах. Сигналы ТУ на КП воздействуют на исполнительные реле, а сигналы ТУ и ТС на ПУ отображаются путем световой сигнализации.

Достоверность передачи информации обеспечивается совокупностью как средств, повышающих аппаратурную надежность, так и средств, обнаруживающих и не допускающих ошибки из-за флуктуационных и импульсных помех.

Предусматривается различная степень защищенности сигналов. Так, для сигналов ТИ и ТС широко применяется циклический опрос. Пункт управления поочередно циклически опрашивает КП по программе, которая может изменяться. В кодах ТИ и ТС предусматривается защита от помех. Если помеха вызывает защитный отказ, то информация может быть принята в последующих циклах. В простейшем случае предусматривается защита от единичных искажений во время кодовой комбинации.

Такая защита может быть недостаточна, например, при вводе информации в ЭВМ. Повышение достоверности передачи достигается путем перехода к двукратной передаче каждого сообщения, или применения более сложных мето-

дов передачи с использованием обратного канала, или перехода к циклическим и другим помехоустойчивым кодам.

Каждое сообщение ТУ, ТИ и ПД при передаче имеет адрес и текст. Для ТС может быть один адрес для группы сигналов, передаваемых многоканально с временным разделением.

Адресная часть кодовой комбинации может иметь:

а) адрес КП назначения или отправки сообщения;

б) номер программы, определяющей вид сообщения (подготовительная или исполнительная команда, запросы ТС, текущих или интегральных значений ТИ, передачи данных и др.);

в) текст каждого из сообщений.

Рис. 14.3. Цикл телеуправления.

1 — начало сообщения; *2* — номер программы; *3* — адрес; *4* — команда ТУ; *5* — сообщение, повторяющее сообщение, полученное с *ДП*; *КИ* — команда исполнения; *ПИ* — подтверждение исполнения команды.

Текст, так же как и адрес, может иметь различное число элементов сообщений в пределах общей унифицированной длины кодовой комбинации. Широко применяется побайтная передача. Заранее известное приемнику число импульсов в сообщении позволяет пропускать на выход сигналы с определенным числом тактов после приема начала сообщения (рис. 14.3) и блокировать выход как в паузах, так и во время импульсов начала сообщения. Такой способ резко повышает защищенность от помех, особенно во время пауз, длительность которых обычно во много раз превышает длительность сигналов. Для простейших сообщений текст отсутствует. В тех случаях, когда текст есть, он может содержать:

а) значение параметра ТИ в двоично-десятичном или в двоичном коде;

б) значение контрольной величины ТИ (заранее известной), передаваемой для коррекции ТИ (контрольное телеизмерение);

в) группу двухпозиционных сигналов ТС;

г) группу двухпозиционных команд ТУ (например, вызов группы ТИ) по вызову;

д) значение многопозиционной команды ТУ в двоичном или двоично-десятичном коде (КК);

е) характер двухпозиционной команды («включить» или «выключить»).

Сообщения ТИ и ТС часто передаются по принципу запрос — ответ и начинаются по запросу с ПУ или в режиме циклического опроса. В простейшем случае для системы только с одним КП запросы с ПУ могут не посылаться и цикл передачи может быть задан контролируемым пунктом. Дополнительное повышение достоверности передачи сигналов ТИ и ТС достигается путем:

а) добавления импульса контроля и перехода к защищенному коду по четности при передаче сообщений ТС, ТИ;

б) использования кода с обнаружением ошибок (например, циклические коды);

в) двукратной передачи сообщений.

Команды телеуправления могут передаваться с двойным квитированием (рис. 14.3). Сначала с ДП посылаются на соответствующий КП адрес и текст подготовительной команды. Текст содержит либо команду типа «включить», «отключить», либо дискретное значение команды при многопозиционном ТУ в виде кодовой комбинации. Адресная часть состоит из адреса КП, номера программы, указывающей, что передается команда ТУ, и адреса объекта на КП.

После декодирования адреса и номера программы КП в узле памяти телеуправляемого КП записывается сообщение, а затем это же сообщение посылается обратно на ДП. С диспетчерского пункта после сравнения ранее отправленного и принятого сообщений вновь передается сообщение, но, например, уже без текста, содержащее номер программы, который разрешает КП исполнить команду. После этого с КП посылается, например, сообщение без текста, содержащее номер программы и подтверждающее исполнение команды. Если на одном из этапов команды возникла ошибка и подтверждение исполнения команды не получено, то новый цикл может повторяться автоматически (например, до трех таких циклов).

Структурные схемы передающих и приемных цифровых устройств могут изменяться в широких пределах в зависимости от технических требований и выбранных решений. Однако общие принципы построения цифровых устройств ТУ—ТС близки к принципам построения многоканальных кодо-импульсных (цифровых) устройств телеизмерения, описанных в гл. 13.

Ограничимся рассмотрением упрощенных и обобщенных принципов построения многофункциональных устройств с временным кодовым разделением сигналов. Структурная схема такого передающего устройства для ПУ или КП изображена на рис. 14.4. Здесь обозначения такие же, как на рис. 13.12—13.22. Сигналы *ТУ*, *ТС*, *ТИ* и *ПД* в виде кодовых комбинаций, имеющих адреса и тексты, через распре-

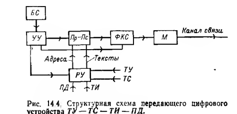


Рис. 14.4. Структурная схема передающего цифрового устройства *ТУ — ТС — ТИ — ПД*.

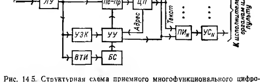


Рис. 14.5. Структурная схема приемного многофункционального цифрового устройства.

делительный узел *РУ*, подаются в параллельном коде на преобразователь параллельного кода в последовательный *Пр—Пс*. Затем в формирователе кодовых сигналов *ФКС* добавляются синхронизирующие и контрольные импульсы принятого помехоустойчивого кода (циклического, Хемминга или др.). В модуляторе *М* осуществляется модуляция сигналов для согласования с каналом связи по частоте. Последовательность действия узлов (алгоритм работы узлов) задается управляющим узлом *УУ*, а скорость переключений — блоком синхронизации *БС*, который ранее на-

зывался генератором тактовых импульсов (блок *БС* может иметь и кратные частоты).

В приемном устройстве (рис. 14.5), предназначенном, например, для работы с циклическими кодами, линейный узел *ЛУ* осуществляет демодуляцию сигналов и поэлементный прием импульсов. Преобразователь последовательного кода в параллельный *Пс—Пр* выдает кодовые комбинации в параллельном коде, которые записываются в узле центральной памяти *ЦП*, например, на регистрах. Адресная часть этих кодовых комбинаций подается на управляющий узел *УУ*, который при этом управляет распределением текстов. Тексты подаются на индивидуальную (канальную) память $ПИ_1—ПИ_N$, запись в которой производится при соответствующем сигнале с управляющего узла *УУ*. На выходе узлов индивидуальной памяти $ПИ_1—ПИ_N$ включены усилители $УС_1—УС_N$.

Узел защиты кодов *УЗК* запрещает или разрешает прием неискаженных кодовых комбинаций в соответствии с принятым помехоустойчивым кодом. Блок синхронизации *БС* вырабатывает тактовые импульсы и импульсы с краткой, более низкой частотой, необходимые для управления последовательностью действия узлов. Синхронизация блока *БС* осуществляется с помощью выделителя тактовых импульсов *ВТИ*, который пропускает передний фронт принимаемых импульсов путем их дифференцирования. Блок синхронизации выполняется во многих случаях в виде задающего кварцевого генератора и делителя частоты на 2, 4, 8, 10 и т. п. В приемном устройстве частота *БС* синхронизируется принимаемыми импульсами.

Параллельно-последовательный преобразователь *Пр — Пс* в передающем устройстве (см. рис. 14.4) имеет регистр сдвига с числом ячеек, равным принятому постоянному числу импульсов в сообщении, например 1 байту. На вход *Пр—Пс* сообщения поступают параллельно с распределительного узла *РУ* (адреса и тексты) или с узла управления *УУ* (номер программы, адреса *КП*). Группа импульсов «начало сообщения» (см. рис. 14.3) в последовательном коде генерируется автоматически. Заданное число импульсов сдвига (движения) подается на регистр с блока управления *УУ*. Они передвигают регистр на число ячеек, равное числу подаваемых импульсов. Нулевая ячейка регистра является последовательным выходом преобразователя. При использовании циклических кодов регистр дополняется цепями формирования контрольных импульсов. При этом он

может работать в широком диапазоне тактовой частоты, например до максимальной скорости передачи по телефонному каналу.

В приемном устройстве сообщение записывается в узел центральной памяти *ЦП*, который разделен на две части: для записи адресов и для записи текстов (рис. 14.5).

Узел последовательно-параллельного преобразователя ***Пс—Пр*** в приемном устройстве может выполнять и функции центральной памяти *ЦП*, если он выполнен в виде регистра сдвига. Число ячеек в регистре равно числу импульсов в сообщении. Принимаемое сообщение подается на последовательный вход регистра, а импульсы движения, вырабатываемые узлом управления *УУ* с помощью блока синхронизации *БС*, передвигают регистр (сдвиг регистра). Одновременно на регистре считается число импульсов движения и останавливается движение, когда пришло n импульсов, т. е. все сообщение принято. После этого сообщение записано в регистре и его можно выдать с ячеек регистра (параллельно).

Устройство управления *УУ* выполняется индивидуально для каждой задачи и привязывает *ДП* и *КП* к каждому отдельному случаю с индивидуальным или типовым числом входов и выходов. Создание индивидуального устройства управления *УУ* облегчается тем, что оно всегда состоит из типовых логических схем (И, ИЛИ, НЕ и др.).

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

УСТРОЙСТВА ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕСИГНАЛИЗАЦИИ

15.1. МНОГОПРОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Многопроводные устройства ТУ—ТС и ТИ широко применяются на нефтебазах, химических и других производствах, где необходимо прокладывать многожильные кабели связи, исходя, например, из требований взрывобезопасности.

Такие устройства также широко применяются в системах управления с ЭВМ производственными процессами с периферийными устройствами, расположенными от ЭВМ на расстоянии до 1—2 км. Применение многопроводных устройств позволяет в ряде случаев резко упростить аппаратуру контролируемых пунктов по сравнению с устройствами телемеханики с одним уплотненным каналом связи.

С увеличением протяженности проводных линий связи их стоимость, начиная с определенной длины $l_{кр}$, превышает стоимость аппаратуры передающих и приемных устройств ТУ, ТС, ТИ. При длине одной проводной линии $l > l_{кр}$ во многих случаях целесообразно применение устройств ТУ—ТС с двухпроводными линиями, стоимость которых меньше стоимости многопроводных линий.

Для кабельных и воздушных проводных линий связи критическая длина $l_{кр} = 200 \div 1000$ м. Применение многопроводных линий во многих случаях осложняется дефицитностью каналов связи, а также трудностями контроля исправности таких линий.

С учетом изложенного выше в последние годы наметилась тенденция применения унифицированных по числу проводов — четырехпроводных линий связи при длине одной линии примерно 2—5 км. Четырехпроводные линии будут занимать промежуточную область между двухпроводными и многопроводными для самых массовых устройств телемеханики. В настоящее время, например, серийно выпускается аппаратура ТС для охранной сигнализации, рассчитанная на четырехпроводные линии связи в виде двух параллельных телефонных пар или специального четырехпроводного кабеля с хлорвиниловой изоляцией, выпускаемого промышленностью.

Наибольший интерес представляют системы ТУ-ТС для самых массовых рассредоточенных объектов с четырехпроводными линиями связи, в которых к одной линии подключается ряд некрупных КП с небольшим объемом сигналов ТС и вызова КП на каждом КП. Потенциальное число таких КП только для охранной сигнализации достигает десятков миллионов. Такие устройства необходимы для обслуживания квартир и получили название сервисных систем, позволяющих с каждого КП в квартире вызывать, например, медицинскую помощь, милицию, слесаря и ставить или снимать квартиру с дистанционной охраны. Близкие по техническим требованиям системы необходимы для контроля за инструментом, сырьем и готовой продукцией на рабочем месте, например в цехах. Объем информации для каждого КП во всех подобных системах составляет 4—7 сигналов ТС и один сигнал вызова КП.

На рис. 15.1 приведены зависимости стоимости C системы телемеханики, включая стоимость линии связи, от суммарной протяженности линии связи l при постоянном чис-

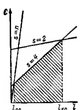


Рис. 15.1. Зависимости стоимости C системы ТС — ТУ от суммарной протяженности линий связи l при постоянном числе контролируемых пунктов $n=$const и различном числе проводов линии S.

ле контролируемых пунктов $n=$ $=$const, рассредоточенных по линии связи цепочечной структуры, при различном числе проводов линии связи s и указанном выше объеме информации на каждом КП.

Как следует из рисунка, по экономическим соображениям целесообразно применять устройства с двухпроводной линией связи при $l>l_{кр}$ и многопроводные с числом проводов $s=n$, если длина линии связи $l<l_{пр}$. Для заштрихованной области экономически целесообразны устройства с четырехпроводными линиями ($s=4$). В частном случае для рассмотреного далее устройства с параллельно-последовательным кодом и $n=49$ имеем $l_{пр}\approx 30\div 60$ м и $l_{кр}=3\div 6$ км в зависимости от типа и стоимости проводной линии связи. Применение систем телемеханики с типовыми четырехпроводными линиями позволяет дополнительно автоматически контролировать исправность линии связи, что является важным положительным неучтенным фактором, повышающим надежность системы.

Следует отметить, что самые массовые рассматриваемые системы будут иметь протяженность одной линии связи с рассредоточенными КП примерно от 100 м до 2—5 км, т. е. будут соответствовать заштрихованной области на рис. 15.1. Одним из важных этапов развития телемеханики в ближайшее время будет расширение ее областей применения и создание систем для самых массовых объектов с проводными линиями связи небольшой протяженности (до 2—5 км). Такие системы по массовости можно будет сравнить с телефонной сетью.

Для устройств телемеханики с двухпроводной линией связи ($l>l_{кр}$), как было показано в гл. 14, наиболее перспективны кодовые (цифровые) системы с последовательными кодами. Для области с протяженностью линии связи $l<l_{пр}$ (рис. 15.1) целесообразны устройства с параллельными кодами, в которых аппаратура КП наиболее простая. Из анализа систем следует, что для промежуточной обла-

сти, заштрихованной на рис. 15.1, наиболее перспективны устройства ТУ—ТС с простейшими параллельно-последовательными кодами. Экспериментальные образцы таких систем были разработаны во Всесоюзном заочном политехническом институте (ВЗПИ).

К этим системам предъявляются следующие технические требования:

1) число сигналов ТС на каждом КП должно быть равно 3—6. При большем количестве сигналов допустимо устанавливать два комлекта аппаратуры на КП;

2) максимальное число КП, подключаемых параллельно к четырехпроводной линии связи цепочечной или древовидной структуры, должно быть равно 30—50 при максимальной ее протяженности 5 км. Дальнейшее увеличение числа КП на одной линии приводит к снижению надежности системы, а меньшее число КП экономически нецелесообразно. Параллельное подключение КП к линии связи повышает гибкость и надежность системы;

Рис. 15.2 Временные диаграммы для первых семи адресов после удлиненного импульса питания.

3) питание КП должно быть дистанционное по проводной линии связи с пункта управления ПУ, т. е. примерно такое же, как и питание телефонных аппаратов. Это повышает автономность и надежность работы КП, тем более что многие КП не имеют местных источников питания. С этой целью допустимо один провод линий связи иметь общим;

4) для упрощения устройства КП аппаратура пункта управления должна работать в режиме автоматического поочередного, циклического опроса всех КП с кодовым разделением сигналов и циклом опроса порядка 2 с;

5) необходимо иметь телефонную связь между ПУ и КП.

В адресных (кодовых) устройствах, построенных с учетом указанных требований, используется простейший параллельно-последовательный код для избирания КП.

Кодовая комбинация для избирания каждого КП состоит из двух последовательных импульсов, передаваемых по проводам параллельно в виде комбинации на сочетания из $n=3$ проводов (рис. 15.2). Четвертый провод общий. Ну-

левая комбинация не используется, поэтому формула кода имеет следующий вид.

$$N = (m^n - 1)^2 = (2^3 - 1)^2 = 49.$$

Максимальное число КП, подключаемых к общей линии, $N = 49$.

Для питания КП передаются удлиненные импульсы по трем проводам, за каждым из которых следуют семь адресных посылок импульсов.

Рис. 15.3. Временная диаграмма сигналов вызова (адреса КП) и ТС с КП по трем проводам.

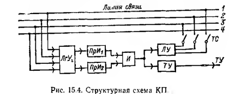


Рис. 15.4. Структурная схема КП

Временная диаграмма для первых семи адресов в каждом из трех проводов приведена на рис. 15.3. С каждого КП сигналы ТС передаются по проводам *1—3* (рис. 15.2), а вызов КП осуществляется путем передачи удлиненных адресных импульсов, которые вызывают циклическое срабатывание электромагнитного реле. Надежность передачи команд ТУ достигается методом накопления сигналов. Питание КП при приеме адресных импульсов и передаче ТС осуществляется от накопительного конденсатора, заряжаемого питающими импульсами через диоды.

Схема КП приведена на рис. 15.4. На входе линии включен логический узел *ЛгУ*, состоящий из логических схем И и «Запрет» на диодах для кодовых комбинаций из последовательных двух импульсов, передаваемых на сочетания из $n = 3$ по проводам *1—3* (провод *4* нулевой). Все устройства КП изготовляются одинаковыми, а индивидуальный

адрес КП устанавливается с помощью шести перемычек, включенных последовательно с диодами. На выходе логического узла *ЛгУ* включены схемы для приема первого и второго импульсов $ПрИ_1$ и $ПрИ_2$, выходные импульсы с которых подаются на логический элемент *И*.

Сигнал на выходе элемента *И* возникает при приеме кодовых комбинаций индивидуального адреса *КП*. В этом случае линейный узел *ЛУ* вырабатывает импульс телесигнализации, передаваемый через контактные первичные преобразователи *ТС* по трем проводам (см. рис. 15.2 и 15.4).

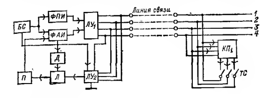


Рис. 15.5. Структурная схема приемо-передающего устройства (пункта управления).

Всего на КП имеется семь зависимых сигналов *ТС*. Индивидуальный вызов КП осуществляется путем циклической посылки с *ПУ* удлиненных адресных импульсов, вызывающих циклическое срабатывание электромагнитного реле в узле *ТУ* (рис. 15.4).

Структурная схема приемопередающего устройства пункта управления приведена на рис. 15.5. Частота тактовых импульсов, циклов и подциклов задается блоком синхронизации *БС*. В формирователе питающих импульсов *ФПИ* формируются импульсы питания, а в формирователе адресных импульсов *ФАИ* — адресные кодовые комбинации поочередно для всех 49 КП. Линейный узел $ЛУ_1$ является выходным линейным узлом.

Поимпульсный прием сигналов *ТС* осуществляется в линейном узле $ЛУ_2$. Выделение индивидуальных сигналов *ТС*, т. е. декодирование, происходит в логическом узле *Л* с помощью дискриминатора *Д*. Сигналы телесигнализации отображаются на пульте *П*. С пульта *П* также передаются индивидуальные вызовы КП через узел *ФАИ*.

Аппаратура пункта управления выполнена на интеграль-

иых микросхемах серии К155 и имеет блочную конструкцию. Аппаратура КП выполнена на дискретных элементах, имеет шесть транзисторов и габариты, равные примерно габаритам пачки сигарет. В дальнейшем устройство КП целесообразно выполнять на интегральных микросхемах в виде специального модуля. Стоимость устройства такого КП должна быть меньше стоимости телефонного аппарата.

15.2. ЧАСТОТНЫЕ УСТРОЙСТВА

В частотных устройствах телемеханики основные функции ТУ и ТС (например, избирание объекта телеуправления) выполняются частотными избирателями или декодирующими устройствами с частотными избирателями.

Частотные устройства широко применяются при рассредоточенных КП с небольшим числом сигналов на каждом КП. Они могут работать без местных источников питания на КП [9].

При частотном методе избирания для КП с одним двухпозиционным объектом телеуправления обеспечивается высокая помехоустойчивость и поэтому в ряде случаев целесообразно совмещать функции избирания и передачи самой команды ТУ, т. е. осуществлять одноступенчатую двухпозиционную передачу команды ТУ без предварительного избирания КП. Объекту присваиваются две кодовые комбинации или две частоты при избирании КП одной частотой. Первая комбинация производит включение, а вторая — выключение двухпозиционного объекта. Такие коды обладают помехоустойчивостью как при флуктуационных, так и при импульсных помехах. Кроме того, в частотных устройствах с помощью простых средств можно избежать ложных команд при обрыве любого проводника или пробое конденсаторов, диодов, транзисторов. Рационально построенные полосовые фильтры частотных избирателей практически не могут изменить частоту настройки настолько, чтобы она перешла в соседнюю фиксированную полосу частот, присвоенную другому фильтру. Практически невозможно также резкое изменение резонансной частоты камертонных и других генераторов. Следовательно, прием ложной команды по этой причине может быть практически устранен, и тогда во многих случаях отпадает необходимость в адресной ответной ТС, т. е. команда ТУ подтверждается общим сигналом для группы объектов (безадресная ТС). Опыт эксплуатации частотных систем телемеханики подтверж-

дает справедливость этого вывода при условии контроля на ДП за правильностью передачи частотных сигналов.

Для передачи сигналов с частотными избирающими признаками применяются специфические кодирующие и декодирующие устройства. Основными их элементами являются генераторы частот и частотные избиратели, предназначенные для разделения (селекции) сигналов по частоте. В устройстве с простейшим избиранием одной частотой сигнал представляет собой импульс переменного тока (радиоимпульс), заполненный частотой, размещенной в одной из неперекрывающихся частотных полос. Разделение сигнала выполняется частотными избирателями — набором резонаторов, резонансных контуров или полосовых фильтров с релейным выходом.

При использовании кодов с двумя или несколькими передаваемыми частотами применяются более сложные кодирующие и декодирующие устройства. В образовании и выделении одного такого сигнала одновременно участвуют несколько генераторов и частотных избирателей или генераторы и избиратели, переключаемые по частоте.

К простейшим устройствам телемеханики с частотным избиранием относятся устройства типа ЧТ и их модификации, разработка которых создала предпосылки для массовой телемеханизации нефтепромыслов [9].

При телемеханизации промысла с рассредоточенными по площади нефтескважинами необходимо в простейшем случае передавать на каждую скважину одну-две двухпозиционные команды «включить», «выключить» и получать с каждой скважины один-два сигнала аварии и сигналы, подтверждающие выполнение команды. Необходимо также иметь одно-два телеизмерения по вызову и двустороннюю телефонную связь с каждой скважиной во время прихода на скважину ремонтной бригады. Эти функции выполняет устройство ЧТ, построенное на принципе частотного избирания скважины (контролируемого пункта), путем одноимпульсной посылки с ПУ напряжения одной из N фиксированных частот, индивидуальной для каждой скважины.

На рис. 15.6 показана упрощенная схема устройства для избирания контролируемого пункта. С помощью переключателя $П$ выбирается нужный провод линии (кустовая структура линий связи). К каждому проводу линии подключено до 12 частотных избирателей. При нажатии на $ДП$ объектного ключа K_1, ..., K_{12} в проводную линию связи от перестраивающегося по частоте генератора $ЗГ$ подает-

ся напряжение одной из 12 звуковых частот, присвоенной данному КП (каждому ключу соответствует своя частота).

На каждом из 12 КП, подключенных к общему проводу, установлено частотное реле с последовательным LC-контуром. Контур нагружен электромагнитным реле P, которое включено через диод. Реле срабатывает, если с ДП передается сигнал в виде синусоидального колебания с частотой, присвоенной данному контуру. Размещение индивидуальных звуковых частот генератора $ЗГ$ F_1, ..., F_{12} и зависимости выходного напряжения $u_{вых}$ от частоты для резонансных LC-контуров приведены на рис. 15.7 ($N=12$). При выбранном постоянном пороге срабатывания $u_{ср}$ каждое реле может срабатывать только на своей частоте.

Рис. 15.6. Упрощенная схема устройства избирания КП в частотной системе ТУ — ТС.

В момент выбора КП цепи исполнительных реле (исполнительных органов) подключаются к линии и может

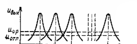


Рис. 15.7. Амплитудно-частотные характеристики частотных избирателей с резонансными частотами F_1, ..., F_N.

$u_{ср}$ — уровень срабатывания реле; $u_{отп}$ — уровень отпускания реле

передаваться команда путем посылки с ДП импульса постоянного тока положительной или отрицательной полярности. Разделение импульсов производится на КП с помощью диодов. Для определения КП, с которого передан общий аварийный (безадресный) сигнал, на пункте управления последовательно опрашивается группа из 12 КП.

Системы ЧТ рассчитаны на подключение к пункту управления до восьми кустов скважин, каждый из которых имеет отдельную трехпроводную линию (третьим проводом служит земля). К каждому кусту подключается до 24 нефтескважин, поэтому максимальное число КП (скважин) в системе 192. Кустовая структура линий связи (см. гл. 6) имеет высокую надежность и удобна в эксплуатации.

Применение частотного метода избирания и сравнительно узкой полосы частот частотных избирателей позволило резко повысить помехоустойчивость устройства и упростить аппаратуру на контролируемых пунктах, поэтому в системе не применяются специальные устройства для защиты от помех. Отечественной промышленностью выпускались и частично выпускаются также другие частотные устройства для телемеханизации трубопроводов, ирригационных сооружений, объектов коммунального хозяйства городов, для управления строительными кранами и т. д.

Устройства с избиранием КП одной частотой применяются при относительно небольшом числе КП, включенных в общую линию связи (до 24) при нескольких объектах ТУ и ТС на каждом контролируемом пункте. При телемеханизации районных служб трубопроводов, газовых промыслов и оросительных систем необходимо включать в общую линию связи длиной до 50—100 км значительно большее число КП, причем отдельные КП должны работать без местных источников питания. Технологические процессы в системах с рассредоточенными объектами, как правило, сравнительно инерционны. Так, на газопроводах давление вдоль газопровода изменяется медленно даже в аварийных режимах. Вследствие этого достаточно контролировать давление в отдельных точках с интервалами 30—60 мин. Команды на один КП передаются спорадически с еще большим средним интервалом времени. Примерно такие же условия по инерционности процессов имеются на нефтепроводах, нефтяных и газовых промыслах, в оросительных системах и т. д.

Устройства телемеханики для трубопроводов должны автоматически передавать на ДП аварийный сигнал при возникновении неисправности на КП. На трубопроводах применяются устройства телемеханики, передающие сигналы путем последовательной передачи двух частот. Число сигналов N при последовательной передаче двух частот равно числу размещений из n по 2:

$$N = A_n^2 = n(n-1).$$

Для увеличения дальности действия целесообразно включать усилитель сигналов, а для уменьшения мощности, потребляемой от источников питания, использовать накопление энергии на конденсаторе. Декодирующее устройство (декодер), удовлетворяющее этим требованиям, при-

меняется в устройствах ТУ—ТС—ТИ для районных служб оросительных систем, газопроводов и нефтепроводов.

Упрощенная схема декодера, питаемого с ДП через проводную линию связи, общую для передачи сигналов ТУ, ТС, ТИ, приведена на рис. 15.8. Для избирания *КП* в линию подаются последовательно синусоидальные напряжения двух частот F_1 и F_2 от звукового генератора на *ДП*. Эти колебания через согласующий трансформатор подаются на два резонансных контура или фильтра. Контур L_1C_1 настроен на частоту F_1, а контур L_2C_2 — на частоту F_2.

Рис. 15.8. Схема дешифратора кода с последовательной передачей двух из n частот A_n^2.

При передаче напряжения с частотой F_1 выходное напряжение первого контура периодически с частотой F_1 заряжает накопительный конденсатор C.

Для избирания объекта напряжение с частотой F_1 подается в течение 1—2 с. За это время конденсатор C заряжается до значения, при котором запасенная в нем энергия достаточна для срабатывания реле P. Сопротивление перехода эмиттер — коллектор нормально закрытого кремниевого транзистора достаточно велико, поэтому его шунтированием можно пренебречь. После окончания передачи частоты F_1 с *ДП* подается колебание с частотой F_2 в течение примерно 0,5—1 с. Выходное напряжение второго контура, подаваемое непосредственно или через выпрямитель на переход база — эмиттер транзистора открывает транзистор и конденсатор C разряжается на реле, вызывая его срабатывание. Реле самоблокируется постоянным напряжением в линии (цепь самоблокирования не показана).

Легко убедиться, что повреждение любого элемента схемы на рис. 15.8 или обрыв любого проводника могут привести только к защитному отказу, а не к ложному избиранию или исполнению ложной команды.

Применение накопительного конденсатора позволяет резко повысить дальность действия и увеличить максимальное число КП, подключаемых к общей линии. Кроме того, импульсные напряжения в линии не вызывают повреждений транзисторов. Это очень существенно при питании

транзисторов через линию связи с изменяющимся затуханием.

После избирания КП команда ТУ может передаваться путем посылки общей частоты для всех КП. Максимальное число КП, подключаемых в общую линию связи в устройстве ТЧР-60, для ирригации $N=56$ при числе частот $n=8$.

15.3. УСТРОЙСТВА С ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ

Принцип действия простейших устройств с временным разделением сигналов основан на поочередном согласованном (синхронном и синфазном) подключении канала связи к индивидуальным командным и сигнальным цепям на ПУ и КП при помощи распределителей, автоматически переключающих соответствующие цепи.

Упрощенная схема передачи команд приведена на рис. 15.9.

Рис. 15.9. Упрощенная схема передачи команд в циклической системе.

Основными функциональными узлами бесконтактных циклических устройств ТУ—ТС являются следующие:

распределитель импульсов на интегральных микросхемах, транзисторных, магнитных, феррит-транзисторных и феррит-диодных элементах (см. гл. 9). В контактных устройствах распределитель выполняется на шаговых искателях или электромагнитных реле;

генератор тактовых (шаговых) импульсов *ГТИ*, работающий в большинстве случаев на частотах 10—150 Гц. Применяются генераторы в виде мультивибратора, *LC*-генератора или кварцевого генератора. При шаговой синхронизации требования к стабильности частоты меньше, однако такая система имеет низкую помехоустойчивость (см. гл. 1). Более высокая помехоустойчивость достигается при инерционной синхронизации генераторов с периодической посылкой синхронизирующих импульсов. В релейных системах с шаговой синхронизацией генератором обычно являлась релейная пульс-пара;

выходные реле в виде магнитных усилителей, работающих в релейном режиме, статических триггеров на транзисторах, управляемых блокинг-генераторов на транзисторах;

специальные функциональные узлы для образования и фиксации импульсных признаков, автоматического запуска, контроля, защиты и др. Импульсные узлы содержат логические элементы, амплитудные и временные селекторы и запоминающие и переключающие элементы на магнитных элементах, транзисторах и микросхемах.

Системы ТУ—ТС с временны́м разделением сигналов широко применяются при сосредоточенных КП (работа пункт — пункт). Характерным для бесконтактных циклических устройств телеуправления и телесигнализации с временным разделением элементов сигнала является устройство типа ТМЭ (телемеханическое на магнитных элементах) [57]. Оно выполняет следующие функции:

телеуправление (ТУ) двухпозиционной коммутационной аппаратурой и оборудованием;

вызов телеизмерения (ВТИ);

передачу двухпозиционных команд регулирования (ТР) «прибавить» и «убавить» с одновременным вызовом ТИ (ТР—ВТИ);

непрерывную автоматическую сигнализацию (ТС) о состоянии или положении двухпозиционных контролируемых объектов.

Сигналы ТС в системе передаются циклически, а команды ТУ — спорадически. Основными блоками аппаратуры являются распределители на магнитных элементах на ПУ и КП, которые поочередно синхронно и синфазно подключают к проводной линии электрические цепи на пункте управления и контролируемом пункте, при этом каждой индивидуальной цепи на ПУ и КП выделяется своя временная позиция. Ячейка распределителя состоит из магнитного элемента с сердечником, имеющим прямоугольную петлю гистерезиса. Элементы включены последовательно через диодно-емкостные цепи связи (см. рис. 9.6).

На выходе ячеек распределителя импульсы возникают поочередно, синхронно с тактовыми посылками импульсов от *ГТИ*. Упрощенная структурная схема передачи команд ТМЭ приведена на рис. 15.9. Для передачи команды последовательно с выходами распределителя включаются электрические ключи K_1, ..., K_m, каждому из которых присваивается своя команда. При замыкании одного из ключей в линию посылается импульс на том такте (временно́й позиции), который соответствует данной команде. Запуск распределителя осуществляется путем подачи на его первую ячейку синхронизирующего импульса.

На рис. 15.10 показана серия импульсов при передаче с пункта управления второй команды. Распределитель на КП замкнут в кольцо, т. е. выходная обмотка его последней ячейки соединена с обмоткой записи первой ячейки через диодно-емкостную связь, как это показано на рис. 9.6. При этом единица, однажды записанная в распределитель, циркулирует с частотой циклов

$$F_ц = F_т/n,$$

где $F_т$ — тактовая частота; n — число ячеек в распределителе.

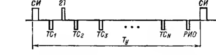


Рис. 15.10. Импульсная серия при передаче команды в системе ТМЭ.

В отличие от этого распределитель на ПУ разомкнут и на его обмотку в первой ячейке подается синхроимпульс *СИ*, принимаемый с КП и выделенный специальной схемой, чем достигается синфазный запуск распределителей в начале каждого цикла. Оба распределителя имеют одинаковую тактовую частоту, что обычно достигается путем использования для тактовой частоты общей силовой сети 50 Гц. Телесигнализация с контролируемого пункта передается аналогично. Ключи управления в этом случае заменяются блок-контактами первичных преобразователей телесигнализации, а импульсы ТС для устранения взаимных помех имеют обратную полярность (рис. 15.10).

Реальная схема устройства ТМЭ значительно сложнее. В ней, например, предусматривается целый ряд защит от воздействия внешних помех, от неправильного действия оператора, при повреждении силовой сети и т. п. Так, для исключения ошибочных действий оператора при передаче команды обеспечивается защитный отказ при рассинхронизации распределителей с одновременной сигнализацией на пульте управления. Повреждение линии связи, отключение силовой сети на КП, а также нарушения, приводящие к рассинхронизации движения распределителей, сопровожда-

ются звуковыми сигналами с одновременным выключением напряжения питания с части аппаратуры.

Для повышения надежности передача команды управления в системе ТМЭ-1 выполняется в три этапа. На первом этапе подготовительная команда передается в индивидуальные запоминающие цепи избираемого объекта на КП (код на сочетание C_N^1), с КП приходят сигналы о подтверждении выполненной операции с адресом объекта. Эти сигналы (ТС) служат разрешением передачи с ПУ специального импульса разрешения исполнения команды РИО (см. рис. 15.10), под воздействием которой на КП включаются выходные цепи исполнительного реле данного объекта.

В схеме КП запрещается срабатывание блока разрешения исполнения при включении более одного исполнительного реле за время одного цикла. После срабатывания реле разрешения исполнения автоматически запрещается прием дополнительных объектных импульсов в последующих циклах. Принятые защиты от исполнения ложной команды резко повышают надежность и позволяют устанавливать аппаратуру ТМЭ-1 для телеуправления ответственными установками на электростанциях и промышленных предприятиях.

15.4. КОМПЛЕКС УСТРОЙСТВ ТЕЛЕМЕХАНИКИ ТМ-320

Комплекс устройств ТМ-320 предназначен для обмена информацией между пунктом управления и многими территориально рассредоточенными контролируемыми пунктами, соединенными с ПУ, выделенными двухпроводными линиями радиально-цепочечной структуры [45]. К каждой линии связи может подключаться от одного до трех КП, образующих последовательную цепочку. Комплекс применяется для телемеханизации объектов промышленных предприятий, энергоснабжения городов и коммунального хозяйства[1].

Обмен информацией между ПУ и КП осуществляется спорадически. Телеизмерение текущих значений (ТИТ) осуществляется при изменении параметра на заданное значение, т. е. передается только новая информация. При сия-

[1] Житомирский завод телемеханики выпускает также близкую по выполняемым функциям, но позже разработанную систему ТМ-310 (см. табл. 18.2).

тии питающего напряжеиия на КП передается аварийный сигнал.

Комплекс выполняет следующие функции:

передачу телесигнализации состояния двухпозиционных объектов;

передачу команд телеуправления двухпозиционными объектами;

передачу команд телерегулирования по типу «больше» или «меньше»;

передачу телеизмерений текущих значений параметров по вызову.

Комплекс состоит из аппаратуры ПУ и аппаратуры КП. Конструктивной базой комплекса является система унифицированных типовых конструкций (УТК). Она выполняется на функциональных блоках АССТ (см. гл. 18) на основе интегральных микросхем. Применение интегральных микросхем позволило повысить быстродействие и надежность комплекса и снизить его стоимость. Комплекс строится по агрегатному принципу с возможностью изменения объема и видов передаваемой информации:

Число радиальных линий, подключаемых к одному ПУ	До 32
Число КП, присоединяемых к каждой линии	До 3
Телесигнализация с каждого КП на ПУ . . .	От 56 объектов (шаг модификации 8)
На каждый КП с ПУ могут быть переданы команды ТУ или ТР	48 объектам (шаг модификации 8)

При двух и трех КП, подключаемых к одной линии связи, суммарное число объектов ТУ не более 48. Линия связи может быть использована для соединения диспетчерских телефонов. С каждого КП может передаваться либо одно ТИ постоянно, либо ряд ТИ по вызову. Информация ТС воспроизводится по схеме «мимического» щита.

Комплекс ТМ-320 обеспечивает передачу ТИ от первичных преобразователей в виде сигналов постоянного тока 0—5, 0—20 мА или постоянного напряжения 0—10 В. Погрешность ТИ составляет 1 % без учета погрешности первичного преобразователя и выходного прибора. Для подключения выбранного первичного преобразователя ТИ к устройству КП используются выходные цепи ТУ или ТР. Значения телеизмеряемых параметров воспроизводятся на ПУ аналоговыми приборами, не входящими в состав комплекса.

Информация, необходимая оператору, накапливается в оперативной памяти ПУ и при воспроизведении может считываться из оперативной памяти ПУ по команде с пульта без передачи информации с КП по вызову. Одновременно воспроизводится не более десяти параметров ТИТ при индивидуальном одновременном вызове с каждого КП не более одного параметра. Для эффективного использования аппаратуры комплекса выбрано разделение во времени при передаче всех видов информации с различных КП и ПУ.

Вся информация преобразуется в кодовую форму и передается по каналу связи 8-разрядными словами (байта-

Рис. 15.11. Диаграмма использования тактов распределителя в ТМ-320. *СИ* — синхроимпульс; *КВ* — квитанция; *РП* — разрешение передачи с КП; *КР* — контрольный разряд.

ми). Для защиты от помех информация передается по каналу связи с повторением и дополнительной защитой каждого байта по паритету. Обнаружение ошибки вызывает запрос на повторную передачу. При трехкратном повторении одной и той же ошибки вырабатывается сигнал неисправности.

Информация передается циклами, каждый из которых состоит из 22 тактов, формируемых распределителем. Пример заполнения 22 тактов распределителя приведен на рис. 15.11. Длительность информационных сигналов равна половине такта, и они передаются в первых половинах тактов. Длительность синхронизирующего импульса СИ в 3 раза больше длительности информационного импульса, занимающего 0,5 такта (синхроимпульс занимает 1,5 такта). Это облегчает выделение синхроимпульса. Кроме того, облегчается разделение других разрядов, так как между двумя соседними разрядами информационного сообщения есть разделительные паузы.

На такте *4* с ПУ передается признак команды разрешения передачи с КП сигналов ТС и ТИТ. На тактах *5—8* при передаче команды ТУ или ТР формируется код функционального адреса, а на тактах *9—12* — код номера группы. На контрольном такте *13* передается сигнал защиты по четности (паритету) для тактов *5—12*. В режиме ТУ или ТР на тактах *14—21* передается номер объекта управле-

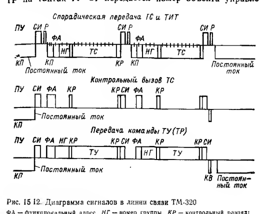


Рис. 15 12. Диаграмма сигналов в линии связи ТМ-320

ФА — функциональный адрес, *НГ* — номер группы, *КР* — контрольный разряд; *КВ* — квитанция, *Р* — разрешение

ния. Для защиты этих тактов по паритету используется такт *22*.

На контролируемом пункте первые два такта не используются. Код положения объектов ТС или значения ТИТ передается на тактах *14—21*, а код номера группы ТС — на тактах *9—12*. Для функционального адреса вида информации используются такты *7* и *8*. При подключении больше одного КП к общей линии связи передается номер КП на тактах *5* и *6*.

Временные диаграммы сигналов в линии связи при спорадической передаче ТС и ТИТ, в режиме контрольного вызова ТС и при передаче команд *ТУ* приведены на рис.

15.12. В ждущем режиме по линии протекает постоянный ток и прерывание его сигнализирует о наличии заявки на передачу или о неисправности аппаратуры. Прерывание постоянного тока вызывает посылку в линию данного направления синхроимпульса с *ПУ* и сигнала разрешения передачи с *КП*. Устройство *КП* при получении этих сигналов передает в том же цикле номер *КП*, функциональный адрес ТИ или ТИТ в зависимости от наличия новой информации, номер группы *ТС* и информационный байт, состоящий из группы *ТС* или значения параметра ТИТ. В следу-

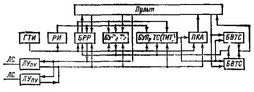


Рис 15.13. Структурная схема устройства ПУ комплекса ТМ-320.

ющем цикле производится повторение передачи. Если информация принята правильно, то с *ПУ* передаются синхроимпульс *СИ* и квитанция *КВ*, а затем в линию подается постоянный ток.

Для контрольного вызова *ТС* с *ПУ* передаются подряд два цикла, состоящих из синхроимпульса *СИ* и функционального адреса контрольного вызова *ТС* с контрольным разрядом защиты по паритету *КР*. В следующем за этим циклом с КП передается квитанция о подготовке триггеров наличия информации всех групп *ТС* и затем информация о состоянии каждой группы *ТС*, так же как и при спорадической передаче *ТС*. Передача команды *ТУ* или *ТР* производится также в течение двух циклов (с повторением). С *ПУ* передаются функциональный адрес команды «включить» или «отключить» либо функциональный адрес «больше» или «меньше» при ТР, номер группы и номер объекта в группе. Если команда принята правильно, то в третьем цикле с *КП* передается квитанция *КВ* о приеме команды.

Структурная схема устройства ПУ приведена на рис. 15 13. Сигналы управления распределителем импульсов

РИ вырабатывает генератор тактовых импульсов *ГТИ*. Он же формирует стробирующие сигналы, разделяющие каждый такт распределители на десять временных позиций. Сигналы *ГТИ* и *РИ* используются другими блоками в режиме передачи и приема информации. Координация работы всех блоков осуществляется блоком задания режима работы *БРР*.

Каждый КП имеет на пульте индивидуальные кнопки для передачи контрольного вызова ТС (КВС). При нажатии кнопки блок задания режима *БРР* и линейные узлы $ЛУ_{ПУ}$ подключают линию выбранного КП к ПУ и из блока *БРР* через $ЛУ_{ПУ}$ передаются синхроимпульс и код функционального адреса КВС. После приема КВС с КП передается сигнал «квитанция», который поступает в блок *БРР* через приемную часть $ЛУ_{ПУ}$ завершая передачу КВС

Прием функционального адреса КВС на КП вызывает заявку на передачу ТС и блокировку постоянного тока в линии, в результате чего блок $ЛУ_{ПУ}$ формирует обобщенный сигнал наличия информации, поступающий в *БРР*. Затем блок *БРР* осуществляет поиск линии связи, в которой отсутствует постоянный ток. При обнаружении такой линии $ЛУ_{ПУ}$ снова подключает ПУ к выбранному КП и в линию передаются синхроимпульс *СИ* и сигнал разрешения передачи информации. В ответ на это с КП передаются функциональный адрес вида передаваемой информации, номер группы объектов и позиционный код состояния объектов группы. После декодирования на *ПУ* (в блоке *БРР*) кода функционального адреса на блок управления приемом ТС *БУПрТС* подается сигнал, разрешающий прием информации.

Блок *БУПрТС* имеет элементы для приема и контроля достоверности принятой информации. При отсутствии ошибки в блок *БРР* передается сигнал КВ, который через блок *БРР* поступает в линию связи на КП и прекращает передачу ТС, если квитанция принята. Одновременно *БУПрТС* формирует сигнал разрешения приема информации блоками воспроизведения ТС *БВТС*, включая сигнал адреса выбранного КП. Принятая информация запоминается одним из блоков *БВТС* с адресом КП и номером группы. Выходные элементы *БВТС* управляют лампами отображения информации на щите (пульте). Сигналы от квитирующих ключей также поступают на *БВТС*. Мигающий свет сигнализирует несоответствие положения объекта и ключа, при

этом *БВТС* вырабатывает сигнал для *БРР* о включении звуковой и световой сигнализации. При соответствии положений ключей и объектов лампы сигнализации гасут.

При спорадическом изменении положения любого объекта прерывается постоянный ток в линии связи с КП и аналогично происходит автоматическая передача ТС. Выбор одинаковой суммарной длины кодовой комбинации (22 такта) и идентичные принципы передачи позволяют использовать один и тот же блок *БУПрТС* в режиме разделения во времени для приема ТС и ТИТ. После окончания приема кода формируется сигнал разрешения преобразования кода в аналоговый сигнал в блоке *ПКА*.

Команды ТУ и ТР формируются с помощью ключей и кнопок на пульте (щите). Изменение положения любого ключа вызывает сигнал, соответствующий номеру КП, группе объектов и объекту в группе. Номер группы и объекта в группе запоминается в блоке управления передачей команд *БУПдТУ*, который имеет элементы для проверки искажений в принятой команде и для формирования последовательного двоичного кода номера группы и позиционного кода номера объекта в группе. Передача кода начинается после нажатия кнопки вида команды «включить» или «отключить». Путем нажатия этих же кнопок передаются команды ТР «больше» или «меньше». Код передается до получения с КП сигнала «квитанция». Для этого выходная цепь ТУ на КП удерживается в замкнутом состоянии 2—3 с.

Команда ТР передается на выходные цепи КП до передачи с ПУ команды отмены ТР или до передач на этот КП новой команды ТУ или ТР. Для отмены команды ТР на пульте (щите) есть индивидуальные кнопки для каждого КП.

Структурная схема устройства КП приведена на рис. 15.14. В ждущем режиме блока задания режима работы *БРР* в линию посылается постоянный ток через линейный узел $ЛУ_{КП}$. С помощью этого сигнала, как отмечалось ранее, контролируется на ПУ линия связи и аппаратура КП. Для установления связи с данным КП с ПУ передается синхроимпульс *СИ*, который подается на дискриминатор импульса по длительности, находящийся в блоке $ЛУ_{КП}$. При определенной длительности импульса с блока $ЛУ_{КП}$ в *БРВ* посылается сигнал установки распределителя импульсов *РИ* и генератора *ГТИ* в начальное положение.

С помощью синхроимпульса, принятого на КП, синфа-

зируется по циклам и тактам распределитель КП с распределителем ПУ. Блоком управления передачей ТС *БУПдТС* воспринимается и запоминается положение объектов ТС, контролируется совпадение положения, переданного ранее на ПУ, с действительным положением объектов. При несовпадении этих положений в блоке формируется сигнал запроса связи с ПУ, по которому с помощью *БРР* прекращается поступление постоянного тока в линию связи от данного КП.

Для выключения постоянного тока в линии от всех КП, подключенных к данной линии с КП, передается дополни-

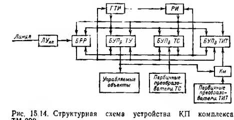


Рис. 15.14. Структурная схема устройства КП комплекса **ТМ-320**.

тельный импульс, эквивалентный по параметрам синхроимпульсу. После этого в линию связи с ПУ передаются синхроимпульс и сигнал «разрешение» передачи информации.

Последовательный код, содержащий двоичный код номера группы объектов и позиционный код состояния объектов группы, формируется *БУПдТС* и выдается при поступлении на него сигнала вызова с *БРР*. До поступления с ПУ сигнала «квитанция» информация передается с КП циклически. В режиме контрольного вызова ТС (КВС) по команде с *БРР* входные цепи, соединяющие *БУПдТС* с первичными преобразователями положения объектов, коммутируются так, что имитируется изменение положения объектов во всех группах. После этого информация о состоянии объектов передается способом, аналогичным способу, описанному выше. В режиме КВС одновременно контролируется работоспособность аппаратуры *БУПдТС*.

Прием вызова ТИТ осуществляется аналогично. Сигна-

лы от первичных преобразователей ТИТ подаются на блок управления передачей ТИТ *БУПдТИТ*, в котором они преобразуются в последовательные двоичные коды. Блок проверяет расхождение ранее переданного значения параметра ТИТ с текущим значением. При расхождении на заранее установленное значение в *БУПдТИТ* формируется сигнал запроса связи, и далее процесс продолжается аналогично описанному выше.

С помощью комплекса ТМ-320 автоматически контролируется исправность аппаратуры ПУ, всех КП и линий связи. Короткое замыкание или обрыв линий связи вызывают аварийную сигнализацию с указанием номера линии связи. Поврежденное направление может быть отключено без нарушения функционирования остальной части комплекса.

Далее в табл. 18.2 приведены основные характеристики других телекомплексов на интегральных микросхемах, выпускаемых на заводах.

15.5. КРАТКИЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ СИСТЕМ

Технически передовые фирмы многих государств выпускают главным образом унифицированные системы телемеханики, близкие между собой по принципам построения и многим техническим решениям (более подробный обзор с указанием фирм дан в [9]). Большинство систем рассчитано на любой канал связи, удовлетворяющий требованиям МККТТ [60а]. Системы обладают универсальностью и применяются для самых разнообразных производственных и других процессов в энергетике, на нефтепроводах, газопроводах, железнодорожном транспорте, в металлургии, водном хозяйстве, метеорологии, на промышленных предприятиях и т. д. Унифицированные системы удовлетворяют требованиям, ранее предъявляемым ко многим различным специализированным системам, т. е. обладают высокими показателями по гибкости. Рассмотрим основные характеристики систем.

По методам и режимам передачи информации преимущественное распространение получила адресно-многоканальная передача информации с преобладающим удельным весом адресных передач, т. е. временное кодовое разделение сигналов. В чистом виде многоканальная или адресная передачи почти не применяются. Группе сигналов ТС, как правило, присваивается индивидуальный адрес, а внутри этой группы информация ТС передается с временным разделением сигналов (многоканально).

Многоканальные системы с временным циклическим разделением применяются при сосредоточенных объектах с простейшим каналом пункт — пункт (1ДП—1КП). Еще реже применяются многоканальные системы с частотным разделением. Используются следующие режимы передачи.

1. Циклическая передача ТИ, ТС, ПД с временным циклическим разделением сигналов, главным образом, при работе пункт — пункт (1КП—1ДП).

2. Циклический программно-адресный запрос информации контроля на КП при КП, рассредоточенных вдоль линии связи, и любой ее конфигурации. Применяются следующие запросы:

всей информации на данном КП; передаются адрес КП, вид запроса и текст сообщения или вид передаваемой информации и текст сообщения;

передачи определенной группы сообщений, например части ТИ и (или) части ТС, при этом ответ содержит адрес КП, адрес вызываемой группы и текст сообщения;

передачи индивидуального сообщения, например одного ТИ, одной ПД или группы ТС. В некоторых системах сообщение с КП передается без адреса, в других передаются адрес КП, адрес объекта и текст сообщения. В большинстве случаев есть только один вид запроса, например общий или индивидуальный. Некоторые системы имеют любой из запросов;

о возникновении новой информации, при этом с ДП поочередно посылается на КП запрос об изменениях с момента предыдущего запроса. При таких изменениях с КП приходит новая информация, которая квитируется. В некоторых системах при недопустимом удлинении цикла передачи в процессе запроса всей информации можно пропускать группы ТС, в которых не произошло изменения состояния.

3. Режим спорадической передачи, который применяется большинством фирм для сигналов ТУ, ТР и ТС. При этом в одних системах эта информация передается с приоритетом, а в других — независимо от рабочего цикла. Аппаратура ряда фирм передает всю информацию спорадически. Как и при запросе новой информации, при спорадической информации предъявляются высокие требования к достоверности передачи. Приоритет различных функций, сообщений или определенных КП достигается путем блокировки сигналов с более низким приоритетом, посылки специ-

ального адреса или применения специальных и приоритетных программ.

Системы имеют широкий диапазон скоростей передачи — от 50 до 1200 Бод, согласованных с нормами МККТТ, и рассчитаны на работу с ЭВМ. Максимальная скорость передачи достигает 12 000 Бод. Работа с ЭВМ требует ограничения сверху времени запаздывания информации. Для удовлетворения этого требования применяются более широкополосные каналы связи и методы повышения эффективного использования канала связи и сокращения максимального цикла передачи наиболее ценной и срочной информации. С этой целью применяются приоритетные программы, в которых не допускается время запаздывания информации более допустимого. Наиболее эффективно, однако, канал связи используется при методах передачи только новой информации.

Согласование работы ЭВМ и систем телемеханики осуществляется в реальном масштабе времени или при помощи промежуточной памяти.

Перейдем к кодам и защите от искажений. Наиболее широкое применение получили двоичные и двоично-десятичные коды. Информация телеизмерения во всех случаях передается кодовыми методами. Предпочтение отдается двоично-десятичному коду, дающему компромиссное решение (максимальная эффективность передачи — двоичный код и простота цифровой индикации — десятичный код).

Информация ТС, за редким исключением, передается с временным разделением сигналов (многоканально). Команды ТУ передаются одноступенчатой комбинацией кода, присвоенной данной команде, или ступенчатым кодом, последняя ступень которого, например C_2^1, определяет вид передаваемой команды.

Производственно-статистическая информация (ПД) передается преимущественно так же, как и информация ТИ. Она предназначена для ввода в ЭВМ, цифровые устройства непосредственно или через промежуточную память. В связи с расширением функций и сферы применения систем телемеханики при выборе кодов для производственно-статистической информации целесообразно обратить внимание на рекомендуемый МККТТ международный 8-элементный код № 5, используемый для техники обработки и передачи данных.

Адреса КП, групп объектов, самих объектов, команд запроса и ПД передаются обычно многоступенчатыми кодами

и во многих случаях — двоичными. Для кодов в системах телемеханики и методов их защиты от искажений только разрабатываются международные рекомендации. Применяются различные степени защищенности и меры повышения достоверности в зависимости от вида сообщений, методов и режимов передачи, качества канала связи, скорости передачи и др.

Получили распространение следующие методы защиты и повышения достоверности: обнаружения и исправления ошибок путем введения избыточности в передаваемом сообщении. В основном применяются коды с контролем на четность, с постоянным весом, итеративный код Элайеса и циклические. Циклические и итеративные коды применяются в соответствии с рекомендациями МККТТ для передачи данных.

Коды, одновременно обнаруживающие и исправляющие ошибки, получили более ограниченное применение из-за сложности аппаратурной реализации. Их применение, по-видимому, перспективно в ответственных случаях, когда обратный канал отсутствует или его применение затруднено. Для повышения достоверности передачи спорадических сообщений (ТУ, ТР, ТС) широко применяется метод обратного канала, обычно в виде адресного квитирования с разрешением исполнения ТУ. В ряде систем метод обратного канала применяется и для запроса, содержащего адрес и вид запроса. В этом случае по обратному каналу запрос повторяется и сличается на ДП. Совпадение результатов является разрешением для воспроизведения и регистрации информации.

В связи с использованием телефонных каналов для передачи телемеханической информации появилась возможность уменьшения вероятности искажения элементарного сигнала в рамках канальной аппаратуры за счет применения модемов (модуляторов — демодуляторов) с помехоустойчивой частотной или фазовой модуляциями, с аналоговым детектором качества сигнала, т. е. устройством, обнаруживающим ошибочные или сомнительные посылки при приеме, без внесения избыточности в передаваемую информацию (см. § 9.4). Это так называемый параметрический метод повышения помехоустойчивости. Применение детектора качества сигнала особенно выгодно в сочетании с кодовым способом обнаружения ошибок, что нашло отражение в разработках ряда фирм.

По технологическим и конструктивным решениям все си-

стемы телемеханики строятся на кремниевых транзисторах или на интегральных микросхемах. Все более широкое применение получают микропроцессоры.

В основе конструирования большинства устройств заложен модульно-блочный принцип. Почти все фирмы располагают набором специализированных унифицированных логических модулей и блоков, а некоторые применяют стандартные промышленные логические наборы и интегральные микросхемы. Проведенный обзор позволяет выявить некоторые основные направления развития:

создание интегральной комплексной многофункциональной телемеханической аппаратуры, способной выполнять практически любую функцию (ТИ, ТС, ТУ, ТР, КК, ПД) при широком выборе алгоритмов функционирования; аппаратура с ограниченной программой при этом является упрощенным вариантом универсального многофункционального решения;

переход к комбинированным (адресно-многоканальным) методам передачи информации с преобладающим удельным весом адресных методов; многоканальные методы применяются только с временным разделением элементов сигналов,

использование циклического режима для передачи контрольной информации при двусторонней связи пункт — пункт и режима циклического программно-адресного запроса при *любой* сложной линии связи, причем запрос может быть общим, групповым, индивидуальным; командная информация передается спорадически и проходит к устройствам, осуществляющим запрос о возникновении новой информации;

создание аппаратуры, работающей при любой конфигурации линии связи;

превращение систем телемеханики в многофункциональные информационные системы со встроенными ЭВМ и микропроцессорами, выполняющие ряд новых функций и отвечающих повышенным требованиям по эффективности управления. Передача большого объема информации, высокие быстродействие, достоверность и эффективность передачи достигаются путем введения приоритетов и согласования работы с ЭВМ на различных рангах, а также путем согласования с работой других телемеханических устройств в национальном и международном масштабах;

применение для передачи информации двоичных кодов с обнаружением ошибок: кодов с контролем по четности,

с постоянным весом, итеративных; переход к циклическим кодам; специальные меры для повышения достоверности передачи спорадической информации путем применения метода обратного канала; повышение достоверности передачи информации в рамках канальной аппаратуры за счет применения модемов, обладающих высокой помехоустойчивостью, с детектором качества сигнала (см. § 9.4);

широкое применение интегральных микросхем и микропроцессоров (модульно-блочный принцип конструкции) и создание на их основе универсальных вычислительных телемеханических многофункциональных комплексов.

В заключение отметим, что в последнее время число фирм, разрабатывающих аппаратуру телемеханики, превысило 150 и продолжает расширяться. Телемеханикой начала заниматься такая «законодательница мод», как американская фирма ИБМ (IBM). Расширяются и области применения методов и средств телемеханики. Продолжается тенденция создания и применения не только унифицированных средств телемеханики на интегральных микросхемах, но и массовых телемеханических комплексов универсального, очень широкого применения со встроенными в их микро-ЭВМ и микропроцессорами.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ТЕЛЕКОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

16.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Автоконтроль и телеконтроль устанавливают соответствие между состоянием объекта контроля и заданной нормой без непосредственного участия человека. Соответствие может устанавливаться для данного или для будущего состояния (прогнозирующий контроль).

В многофункциональных системах телемеханики расширяется применение телеконтроля производственных и других процессов, который отличается от автоконтроля тем, что осуществляется на расстоянии через каналы связи. Кроме того, для повышения надежности системы периодически контролируются различные цепи системы телемеханики и каналы связи с помощью технических средств диагностики повреждений. Таким образом, устройства телеконтроля и технической диагностики входят в многофункциональные системы телемеханики.

Автоконтроль и телеконтроль освобождают человека от утомительных рутинных операций в самых разнообразных сферах его деятельности, в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, при

научных исследованиях, обучении и т. д. Необходимым условием такого контроля в любом его применении должно быть знание установленной нормы. Норма может быть выражена в количественной или качественной форме. В последнем случае нормой является, например, нормированное качество усвоения материала при обучении. В дальнейшем ограничимся контролем с нормой в количественной форме.

При автоконтроле и телеконтроле в отличие от автоматических измерений нет необходимости знать численные значения контролируемых величин, а достаточно установить значение абсолютного или относительного допуска на отклонение от нормы (например, не больше чем на 5, 10, 20 % или на $+10 \div -15$ %).

Отклонение за пределы установленной нормы вызывает предупредительный, аварийный или другие сигналы. Формирование таких сигналов — одна из главных функций автоконтроля.

Будем называть системами автоконтроля и телеконтроля комплекс устройств, осуществляющих автоматический контроль большого числа величин или одной или нескольких величин, но требующих значительной обработки информации для суждения об отклонении от установленной нормы. К последнему случаю относится, например, отбраковка изделий в результате статистической обработки результатов контроля.

В промышленных системах автоконтроля обычно различают, что в них контролируется: сырье, готовая продукция, процесс производства или процесс эксплуатации. Устанавливаемое допустимое отклонение от нормы в системах, например в процентах, во много раз больше погрешностей измерительных систем (5—20 % вместо 0,2—2,5 %), поэтому информационная емкость системы автоконтроля соответственно меньше, т. е. по сравнению с измерительными в них имеет место «сжатие» информации. Если же допустимое относительное отклонение от нормы равно погрешности измерений, то «сжатия» информации нет.

Во многих случаях системы автоконтроля совмещают функции контроля и измерения и называются контрольно-измерительными. Такие системы выполняют функции контроля, а при необходимости иметь более подробную информацию о контролируемых параметрах осуществляют процесс измерения.

На рис. 16.1 в качестве примера приведена структурная схема системы автоматического контроля большого числа параметров. Величины в норме здесь выражаются в аналоговой форме. В отличие от измерительных систем на один из входов органа сравнения *СО* с первичных преобразователей $ПП_1—ПП_N$ через коммутатор $КМ_1$ подаются значения контролируемых параметров, а на другой вход *СО* подается не мера, а норма от генератора нормы *ГН*. На выходе сравнивающего устройства включено устройство формирования сигналов *ФС*. Отклонение от заданной нормы, например, на 5 или 10 % отображается и записывается на выходных приборах (индикаторах) $ВП_1—ВП_N$.

На рис. 16.1 для всех первичных преобразователей задана единая норма. При различной норме между генератором нормы *ГН* и сравнивающим органом *СО* включается коммутатор. Все коммутаторы работают синхронно и синфазно. В дополнение к *N* индикаторам отклонения от нормы на выходе коммутатора $Км_2$ может включаться общий самописец или электрическая вспомнишущая машинка для поочередной регистрации каналов.

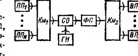


Рис. 16.1. Структурная схема многоканальной системы автоконтроля.

В системах автоконтроля, реализуемых по схеме на рис. 16.1, норма должна храниться в аналоговой форме, что связано с техническими трудностями. Для устранения этого недостатка хранение нормы осуществляется в цифровой форме (магнитная или другая запись), в между устройством хранения нормы и элементом сравнения включается цифрово-аналоговый преобразователь. Возможен и второй вариант хранения нормы в цифровой форме, но с аналого-цифровым преобразователем на выходе коммутатора $Км_1$ и устройством сравнения в цифровой форме, например, в виде дешифратора кодов.

Системы автоконтроля часто выполняют дополнительные функции, не имеющие прямого отношения к автоконтролю. К ним относятся:

промежуточные преобразования сигналов;

формирование тестовых (испытательных) сигналов;

операции счета (изделий и т. п.);

измерения (аналоговые или цифровые);

математическая обработка результатов контроля для прогнозирования и выполнения других операций;

диагностические функции.

16.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОКОНТРОЛЯ И ТЕЛЕКОНТРОЛЯ

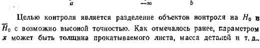
Рассмотрим эффективность контроля для одного параметра *x*, требующего статистической обработки результатов с целью установления соответствия с нормой [54]. Пусть задан объект контроля, состояние которого описывается значением параметра *x*. Независимо от природы этого параметра важно только, что *x* характеризует качество объекта, оцениваемое при контроле. Примерами параметра *x* могут быть толщина пронатываемого листа, масса детали или другие параметры массовых изделий. Параметр *x* можно рассматривать как случайную величину с плотностью распределения $f(x)$.

Пусть для объекта задано условие работоспособности, т. е. диапазон, в котором должен находиться x (например, толщина, масса и т. д.):

$$a < x < b. \qquad (16.1)$$

При выполнении этого условия x находится в допускаемой области (рис. 16.2). Если условие (16.1) не выполняется, то объект неработоспособен (брак, отказ).

В соответствии с этим принимаем две взаимно исключающие гипотезы: H_0 — объект работоспособен и $\overline{H}_0$ — объект отказал. Априорные вероятности соответствующих событий имеют вид:



$$P(H_0) = \int_a^b f(x)\,dx; \quad P(\overline{H}_0) = \int_{-\infty}^{a} f(x)\,dx + \int_b^{\infty} f(x)\,dx. \qquad (16.2)$$

Целью контроля является разделение объектов контроля на H_0 и $\overline{H}_0$ с возможно высокой точностью. Как отмечалось ранее, параметром x может быть толщина прокатываемого листа, масса деталей и т. д.,

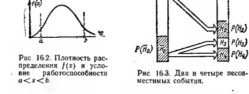


Рис. 16.2. Плотность распределения $f(x)$ и условие работоспособности $a<x<b$

Рис. 16.3. Два и четыре несовместимых события.

а (16.1) — это допусковая область параметра x. При реальном контроле всегда возникает ошибка y, в результате которой вместо истинной величины x наблюдается также случайная величина, но не x, а

$$z = x + y, \qquad (16.3)$$

где y — случайная ошибка контроля.

Тогда вместо (16.1) справедливо условие

$$a' < z < b', \qquad (16.4)$$

где a', b' — допусковая область случайной величины x, не совпадающая в общем случае с областью (16.1).

Замена условия работоспособности (16.1) условием (16.4) приводит к ошибочным решениям, при этом часть работоспособных объектов контроля бракуется, а часть отказавших объектов признается годными.

На рис. 16.3 изображены два и четыре несовместимых события, т. е. удовлетворяющих условиям

$$P(H_0)+P(\overline{H}_0)=1;\ \ P(H_1)+P(H_2)+P(H_3)+P(H_4)=1, \quad (16.5)$$

где H_1 — истинное значение параметра в пределах допуска и измеренное значение также в пределах допуска ($a<x<b$; $a'<z<b'$); H_2 — истинное значение параметра в пределах допуска, измеренное за его пределами ($a<x<b$; $z>b$ или $z<a'$); H_3 — истинное значение параметра за пределами допуска и измеренное значение в пределах допуска ($x<a$ или $x>b$; $a'<z<b'$); H_4 — истинное значение параметра за пределами допуска и измеренное значение также за пределами допуска ($x>b'$ или $x<a$; $z>b'$ или $z<a'$).

События H_1 и H_4 соответствуют правильным решениям, в H_2 и H_3 — ошибочным. Вероятности появления ошибок и $P(H_3)$ могут быть использованы как критерий достоверности, однако для характеристики качества контроля лучше использовать вероятность правильного решения как критерий достоверности

$$D=P(H_1)+P(H_4)=1-P(H_2)-P(H_3). \quad (16.6)$$

Во многих случаях ошибки $P(H_2)$ и $P(H_3)$ неравноценны по ожидаемым результатам, как это показано в § 16.3. Тогда следует оценивать раздельно степень достоверности решений «объект контроля годен» ($D_г$) и «объект контроля негоден» ($D_{н.г}$) с помощью следующих отношений:

$$D_г=P(H_1)/[P(H_1)+P(H_3)];\ \ D_{н.г}=P(H_4)/[P(H_2)+P(H_4)]. \quad (16.7)$$

Для оценки качества автоконтроля необходимо знать вероятности появления событий H_1, H_2, H_3 и H_4 (см. рис. 16.3), вычисленные исходя из знания законов распределения отдельных составляющих.

Пусть $f_1(x)$ — плотность распределения контролируемого показателя качества объекта контроля, а $f_2(y)$ — плотность распределения случайных ошибок в оценке показателя качества в соответствии с (16.3). Для простоты будем считать, что $f_1(x)$ и $f_2(y)$ независимы, а систематическая ошибка в оценке показателя качества устранена. Тогда для привятых границ разделения объектов контроля a и b (см. рис. 16.2) справедливы следующие ненормированные законы распределения отдельных составляющих в соответствии с рис. 16.4, *а* и *б*:

1) закон распределения объектов контроля, признаваемых левее точки допустимых значений (левее точки a):

$$\psi_1(x)=f_1(x)\int_{-\infty}^{a-x} f_2(y)\,dy; \quad (16.8)$$

2) закон распределения объектов, принимаемых годными:

$$\psi_2(x) = f_1(x) \int_{a-x}^{b-x} f_2(y)\, dy. \qquad (16.9)$$

3) закон распределения объектов контроля с показателем качества выше области допустимых значений:

$$\psi_3(x) = f_1(x) \int_{b-x}^{\infty} f_2(y)\, dy. \qquad (16.10)$$

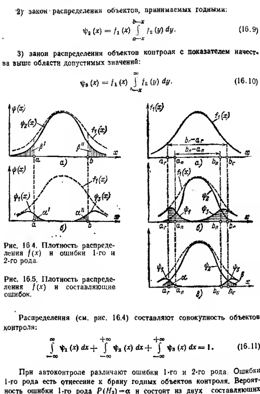


Рис. 16.4. Плотность распределения $f(x)$ и ошибки 1-го и 2-го рода.

Рис. 16.5. Плотность распределения $f(x)$ и составляющие ошибок.

Распределения (см. рис. 16.4) составляют совокупность объектов контроля:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_1(x)\, dx + \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_2(x)\, dx + \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_3(x)\, dx = 1. \qquad (16.11)$$

При автоконтроле различают ошибки 1-го и 2-го рода. Ошибки 1-го рода есть отнесение к браку годных объектов контроля. Вероятность ошибки 1-го рода $P(H_2) = \alpha$ и состоит из двух составляющих (рис. 16.4, *а* и *б*):

$$P(H_2) = \alpha = \alpha' + \alpha'', \qquad (16.12)$$

что соответствует вероятности ошибочного отнесения годных объектов контроля за пределы нижней α' и верхней α'' границ (рис. 16.4).

К ошибкам 2-го рода относят ошибочное признание годными объектов контроля, находящихся за пределами допустимых границ a и b. Вероятность ошибки 2-го рода

$$P(H_3) = \beta = \beta' + \beta''. \tag{16.13}$$

Это соответствует вероятности ошибочного признания годными объектов контроля с показателями качества левее β' и правее β'' границ a и b (рис. 16.4).

Для уменьшения ошибок автоконтроля вводят упреждающие (производственные) допуски a_n и b_n (рис. 16.5, a—$в$) уже в области эксплуатационных (гарантированных) допусков:

$$b_n - a_n < b_\text{г} - a_\text{г}. \tag{16.14}$$

Выполнение условия (16.14) соответствует увеличению ошибок 1-го рода α' и уменьшению вероятности ошибок 2-го рода β (рис. 16.5), при этом (16.8), (16.9) и 16.10) запишутся следующим образом:

$$\psi_1(x) = f_1(x) \int_{-\infty}^{a_n - x} f_2(y)\,dy, \quad \psi_2(x) = f_1(x) \int_{a_n - x}^{b_n - x} f_2(y)\,dy;$$

$$\psi_3(x) = f_1(x) \int_{b_n - x}^{\infty} f_2(y)\,dy. \tag{16.15}$$

Ошибки 1-го и 2-го рода запишутся следующим образом:

$$\alpha = P(H_2) = \int_{a_\text{г}}^{b_\text{г}} \psi_1(x)\,dx + \int_{a_\text{г}}^{b_\text{г}} \psi_3(x)\,dx;$$

$$\beta = P(H_3) = \int_{-\infty}^{a_\text{г}} \psi_2(x)\,dx + \int_{b_\text{г}}^{\infty} \psi_2(x)\,dx. \tag{16.16}$$

Значение упреждающих допусков выбирается в результате сопоставления затрат, связанных с совершением ошибок α и β для конкретного объема контроля. Для этого необходима однозначная зависимость между упреждающими допусками и вероятностями ошибок α и β.

16.3. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ (ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА)

Автоматический поиск и локализация неисправностей относится к области технической диагностики, которая в свою очередь входит в автоконтроль, так как при этом устанавливается соответствие между состоянием объекта контроля и заданной нормой.

В рассмотренных выше системах автоконтроля устанавливался только факт работоспособного и неработоспособного состояния (параметры в норме или за границами нормы). В отличие от этого в системах технической диагностики ставится более сложная задача: не только установление факта работоспособности, но и нахождение местоположения отказа (локализация неисправностей). Это достигается с помощью специальных методов и способов поиска неисправностей, реализующих алгоритмы диагностики. Восстановление отказавшей системы или устройства в результате нахождения места повреждений в агрегатированной и унифицированной аппаратуре достигается путем замены отказавшего модуля или блока работоспособным. В результате разделения модулей и блоков на типовые упрощается поиск неисправностей и эксплуатация аппаратуры.

Системы для автоматического поиска неисправностей, как отмечалось ранее, относятся к отдельному классу систем технической диагностики, так как они отличаются более сложной логической частью, реализующей способы поиска неисправностей. В остальном структуры первичных преобразователей и систем технической диагностики близки или не отличаются от структуры систем автоконтроля и от измерительных систем.

Рассмотрим способы поиска и локализации неисправностей. При автоматическом поиске неисправностей система или устройство должны обладать следующими свойствами, являющимися условиями поиска неисправностей:

1) могут находиться только в двух взаимоисключающих состояниях (работоспособном или неработоспособном), обозначаемых 1 или 0;

2) могут быть разделены на отдельные функциональные элементы, каждый из которых может находиться только в работоспособном или неработоспособном состоянии (1 или 0).

В связи с неограниченным разнообразием устройств, подлежащих диагностике, задачи автоматического поиска неисправностей решаются только путем сопоставления упрощенных их моделей и разработки методов диагностики на модели. Наиболее часто устройство представляют в виде функциональной или функционально-логической модели. Функциональная модель объекта контроля может отличаться от структурной схемы выбором функциональных узлов и элементов. Так, при построении обычной структурной схемы исходят из закономерностей процессов, описывающих работу устройства.

При построении функциональной модели для поиска неисправностей выбор функциональных элементов (узлов) определяется точностью локализации неисправностей (например, с точностью до одного модуля). Функциональная модель строится при определенных предположениях, которые в основном сводятся к тому, что для каждого функционального элемента заданы номинальные значения входных и

выходных сигналов, их функциональная зависимость и способ контроля. Функциональный элемент модели считается неисправным, если при номинальных его входных сигналах выходные сигналы отличаются от номинальных. Общее число возможных состояний S объекта контроля при разделении его на N функциональных элементов для принятых условий поиска.

$$S = 2^N - 1. \tag{16.17}$$

Определение такого большого числа состояний даже при $N > 7$ связано с техническими трудностями. Поэтому ограничиваются предположением, что отказал только один из N функциональных элементов, т. е. ограничиваются одиночными отказами, число которых

$$S_0 = C_N^1 = N. \tag{16.18}$$

Функциональная модель является удобной формой представления объекта контроля для поиска неисправностей во многих аналоговых и дискретных устройствах, за исключением, например, резервированных систем. В последнем случае используется логическая модель объекта контроля, которая строится также на основе структурной схемы. Отличие заключается в том, что выходные и входные сигналы рассматриваются как логические переменные, принимающие только два возможных значения (0 и 1). Состояния объекта контроля определяются путем формального применения алгебры логики.

Для поиска неисправностей применяются последовательный и комбинационный методы и различные сочетания последовательного и комбинационного методов, в соответствии с которыми разрабатывается программа поиска. **Последовательный метод** заключается в таком построении процедуры поиска неисправностей, при котором информация о состоянии отдельных функциональных элементов вводится и логически обрабатывается последовательно.

Реализация метода заключается в основном в определении очередности контроля выходных параметров функциональных элементов. Программа поиска при этом может быть жесткой или гибкой. Жесткая программа предусматривает контроль выходных параметров функциональных элементов по заранее определенной последовательности. В отличие от этого по гибкой программе содержание и порядок последующих проверок зависят от результатов предыдущих. Такая программа требует более сложной логической обработки результатов контроля и применяется в комплексе с более производительными ЭВМ.

При **комбинационном методе** поиска неисправностей вначале вводятся все результаты контроля параметров, а затем они логически обрабатываются. Естественно, что такой метод требует более сложной обработки.

Для реальных систем возможно большое разнообразие программ поиска неисправностей, требующих большого объема исходной информа-

ции о состоянии объектов контроля и сложная логическая обработка результатов контроля, поэтому разработаны приближенные способы построения оптимальных программ поиска неисправностей. Эти программы в основном представляют собой многошаговый процесс поиска с выбором на каждом шаге лучшего варианта по экстремуму заданной функции предпочтения.

Перечислим некоторые распространенные способы построения программ поиска неисправностей:

1) последовательного функционального анализа;
2) половинного разбиения,
3) время — вероятность;
4) с информационным контролем;
5) ветвей и границ;
6) иерархический;
7) инженерный.

Кратко рассмотрим только первый из них.

Способ последовательного функционального анализа был одним из первых способов построения программ поиска неисправностей. При этом способе прежде всего определяются основные функции диагностируемых устройств, выполнение которых позволяет считать, что и все устройство выполняет поставленные перед ним задачи. К таким функциям относят:

генерирование сигналов на выходе устройства;
прием и преобразование сигналов;
отображение сигналов;
управление;
электропитание и др

Контроль работоспособности всего устройства зависит от контроля за выполнением всех перечисленных частных функций. Для этого выбираются и контролируются параметры, от которых зависит выполнение основных функций. Если одна из перечисленных функций не выполняется по одному из контролируемых параметров, то возникает задача поиска неисправностей. При этом параметр, вышедший за границы допусков, рассматривается как функция других аргументов. Схему поиска неисправностей называют *деревом функций*.

Автоматический поиск неисправностей в сложных системах относится к интересным и быстро развивающимся направлениям в науке и технике. В системах телемеханики широко применяется периодический контроль исправности каналов связи как самого слабого по надежности звена и контроль функционирования основных блоков.

Так, в управляющих вычислительных телекомплексах (УВТК) (см. гл. 18) предусмотрен комплекс программ диагностирования для автоматического контроля, поиска неисправностей и обнаружения повреждений с точностью до отказавшего сменного блока. Такой эффек-

тивный контроль и диагностирование относятся к важнейшим способам обеспечения требуемой надежности УВТК на базе микро-ЭВМ. Программы автоматического контроля и диагностирования контролируют УВТК на нескольких уровнях. В определенных режимах УВТК производится сравнение служебных слов, принимаемых из магистрали и выдаваемых при обмене информацией. При несовпадении служебных слов в магистраль посылаются тесты контроля, и если тест показал неисправность магистрали, то запрещается прерывание контроля и закрывается семафор исправности магистрали, блокируя обращение к ней. Информация о неисправности магистрали запоминается и отображается с помощью сигнальных элементов сервисного блока. Отказы микропроцессора контролируются с помощью таймера. Также проверяются интервалы межмашинного обмена путем их сравнения с допустимыми значениями. Кроме того, результаты диагностики выводятся на цветной дисплей при вызове технологических кадров в виде сообщений о недостоверности выводимой информации. Периодически контролируется работоспособность КП и устройств приема—передачи ПУ. Тестами служат периодические запросы информации с каждого КП поочередно с контролем времени ответа.

16.4. РАСПОЗНАВАНИЕ В АВТОКОНТРОЛЕ

Переход от ручного контроля к автоконтролю, как отмечалось ранее, превышает эффективность производственных и других процессов. Для сложных автоматически контролируемых комплексов соответствие действительных состояний объектов и установленных для них норм по отдельным параметрам характеризует работоспособность всего комплекса. Эффективность автоконтроля за сложными комплексами все больше определяется тем, насколько полно ЭВМ воспринимает информацию об интегральном состоянии и поведении объектов контроля. Следовательно, возникают задачи автоматического распознавания технического состояния комплекса с помощью ЭВМ, микропроцессоров и других средств обработки информации.

В настоящее время такие задачи решаются неавтоматически специалистами высокой квалификации, в которых с развитием автоматизации ощущается все больший недостаток. Кроме того, человек часто дает недопустимо субъективные решения. Отметим, что задачи автоматического распознавания технического состояния совокупности объектов контроля значительно шире рассмотренных выше задач поиска неисправностей и получили общее название распознавания образов.

Распознавание образов применяется для автоматического распознавания печатных, рукописных и фотографированных знаков, текстов,

рисунков и схем, звуков, речи, команд, передаваемых голосом, выявления некоторых ситуаций в сложных технических комплексах, таких, как критическое и аварийное состояния.

Главными целями распознавания образов является расширение возможностей общения человека с машиной и расширение возможностей автоматизации путем освобождения человека-операторов от многих операций, ограничивающих быстродействие, надежность и эффективность функционирования автоматизированных комплексов.

Распознавание определяется как процесс отнесения ситуаций, явлений, образов к одному из нескольких или многих заранее определенных классов на основе анализа их характеристик. При распознавании возникают взаимосвязанные задачи выбора параметров распознавания и задачи нахождения и оценки качества решающей функции [63].

Для выбора параметров предварительно выделяют совокупность параметров (признаков), характеризующих рассматриваемый образ, и обозначают их переменными

$$x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_m.$$

Эти признаки могут быть представлены в виде точки в многомерном пространстве, которое называется пространством объектов, а вектор x — вектором объекта.

Вторая взаимосвязанная задача нахождения решающей функции должна рассматриваться с учетом сведений об объектах. Решающая функция должна удовлетворять следующим условиям: $f(\overline{x})\geqslant 0$, если объект x принадлежит одному классу, $f(\overline{x})<0$, если объект x принадлежит другому классу.

Следовательно, решающая функция позволяет найти поверхность (называемую гиперповерхностью), разделяющую многомерное пространство на классы.

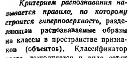
Широко применяемый непараметрический (адаптивный) метод распознавания базируется на процедуре оптимизации параметров распознавания с поэтапным приближением к цели (итеративно).

На рис. 16.6 приведена структурная схема распознающей системы. Детектор признаков *ДПр* воспринимает физическое воздействие, характеризующее объекты, и выдает на выходе совокупность сигналов, несущих признаки (параметры) распознаваемого образа. При необходимости в детекторе признаков производится освобождение (фильтрация) от шумов (помех), нормализация по геометрическим размерам и положению (масштабирование), координатные преобразования и т. д. Детектор признаков во многих случаях выполняется в виде рецепторного фотоэлектронного поля с системой развертки, например, типа телевизионной для распознавания образов.

В узле памяти *УП* хранятся программы исходных, промежуточных и конечных данных, а также программы функционирования. Особен-

ность его состоит в необходимости хранения описаний распознаваемых классов и запоминания значений оптимизируемых параметров классификатора *Клс*. Узел памяти УП может содержать оптические маски, магнитные барабаны, аналоговую память и т. д.

Решение о принадлежности совокупности объектов (образа) к одному из заранее определенных классов принимает классификатор *Клс*. Это осуществляется в соответствии с принятым критерием распознавания или правилом решения в устройстве на основе признаков, выдаваемых детектором признаков *ДПр*.



Критерием распознавания называется правило, по которому строится гиперповерхность, разделяющая распознаваемые образы на классы в пространстве признаков (объектов). Классификатор часто выполняется в виде сетки из линейных пороговых элементов.

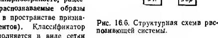


Рис. 16.6. Структурная схема распознающей системы.

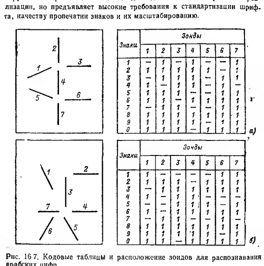
Сравнение действительного и образцового описаний распознаваемых классов и выработка сигналов ошибки производится в устройстве сравнения *УСр*.

Для функционирования распознающей системы необходимым условием является наличие сведений о классах совокупности объектов. Эти сведения задаются заранее или возникают в процессе обучения, который в этом случае предшествует процессу классификации. В процессе обучения на вход распознающей системы последовательно подаются признаки образов каждого класса, и, если при этом системе сообщается, к какому классу принадлежит образ, процесс называется обучением с учителем. Если системе не сообщается, к какому классу принадлежит образ, то процесс называется обучение без учителя или самообученнем. В заключение рассмотрим некоторые известные методы распознавания простейших признаков.

Метод зондов заключается в том, что на рецепторном поле размещается ряд зондов, выполненных, например, в виде набора фотопроводниковых полосок или соответствующей маски из фотопроводников. На рецепторное поле оптически проектируется распознаваемый знак (образ), и каждому знаку соответствует своя комбинация определенным образом расположенных зондов, для которых максимально изменяется электропроводность при проектировании своего знака. Зонды подключаются к декодирующему устройству, осуществляющему идентификацию знаков.

В качестве примера на рис. 16.7, *а* приведено расположение зондов по Даймонду (слева) и на рис. 16.7, *б* (слева) — по рекомендациям

Института кибернетики АН УССР для распознавания арабских цифр. *Кодовые таблицы для них приведены на рис. 16.7, а и б справа.* Зонды, например, выполняются в виде фотосопротивлений, на которые проектируется изображение знака. Метод зондов отличается простотой реализации, но предъявляет высокие требования к стандартизации шрифта, качеству пропечатки знаков и их масштабированию.



Знаки	Зонды						
	1	2	3	4	5	6	7
1	—	1	—	1	—	—	1
2	1	1	1	1	1	—	1
3	—	1	1	1	—	1	1
4	1	—	1	1	—	1	—
5	1	1	1	—	—	1	1
6	1	1	—	1	1	1	1
7	—	1	1	—	—	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	—	1	1
0	1	1	1	—	1	1	1

а)

Знаки	Зонды						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	—	—	—	—	1	1
2	1	1	1	—	1	1	1
3	—	1	1	1	1	1	1
4	1	—	1	1	—	—	—
5	—	—	1	1	1	—	1
6	1	—	1	1	1	1	1
7	—	1	1	—	—	1	—
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	—	1
0	1	1	—	1	1	1	1

б)

Рис. 16.7. Кодовые таблицы и расположение зондов для распознавания арабских цифр

Метод фрагментов. При реализации метода в распознаваемых знаках выделяются определенные области и проверяется совпадение этих областей с выбранными фиксированными областями поля изображения (фрагментами). Для распознавания 30 букв русского или 26 букв латинского алфавита и 10 цифр в отечественном читающем устройстве, работающем по методу фрагментов, использовано 20 основных и 6 дополнительных фрагментов. Допускается сдвиг знаков по горизонтали и вертикали до 5 %.

Корреляционные методы. Для распознавания букв, цифр и других знаков, напечатанных типовым шрифтом (машинопись, типо-

графские тексты), широко применяются методы корреляционного анализа изображений знаков. Признаками распознавания могут быть значения коэффициентов корреляции между распознаваемым изображением знака и заранее сформированными образцами знаков. Процедура распознавания изображения неизвестного знака сводится, например, к вычислению коэффициентов корреляции между элементами изображений распознаваемого и образцового знаков. В корреляционных методах предъявляются меньшие требования к центровке знаков, к пропечатке, масштабированию и стандартизации шрифтов.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

17.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Передача данных (ПД) относится к области электросвязи. Аппаратура передачи данных (АПД) выполняет функции передачи информации по каналам связи к ЭВМ и (или) от ЭВМ. Информация передается в двоичном и других кодах между терминалами и ЭВМ или между вычислительными центрами. При автоматизации производственных и других процессов передача буквенно-цифровой производственно-статистической информации (ПСИ) осуществляется примерно такими же способами и аппаратурой, как и передача данных, поэтому также называется передачей данных. Информация может передаваться между устройствами первичного ввода информации на машинные носители или терминалами и ПУ с помощью системы телемеханики.

При автоматизации производственных процессов АПД передает производственно-статистическую информацию о состоянии оборудования, выработке энергии, запасах сырья, бухгалтерского учета, планирования и управления и др. Эта информация предназначается для административного управления и отчетности. Аппаратура передачи данных является неотъемлемой частью автоматизированных систем управления (АСУ), вычислительных центров, крупных систем телемеханики и других систем управления, планирования, учета и научных исследований.

Состав АПД и скорость передачи могут изменяться в широких пределах в зависимости от конкретных условий. Так, при обмене информацией между вычислительными центрами АПД выполняет функции передачи данных (в подавляющем большинстве случаев с магнитной ленты на магнитную ленту) через телефонные или более широкополосные каналы связи со скоростью от 1200 до 96 000 Бод и более (рис. 17.1).

При обмене информацией между ЭВМ и различными периферийными устройствами в состав комплекса аппаратуры передачи данных могут входить следующие устройства:

Устройства для первичного ввода (взятия на учет) и сбора информации. Они выполняют функции первичного ввода информации на машинные носители (перфоленту, перфокарты, магнитную ленту оперативного запоминающего устройства). Эта операция производится оператором или выполняется автоматически при поступлении информации от различных первичных преобразователей. Ее целью является, во-первых, представить информацию в дискретном закодированном виде, приспособленном для работы механических или электронных устройств (сортирующих, передающих данные и др.), во-вторых, создать буферную память, к которой в нужный момент могут обратиться ЭВМ и устройства сбора информации или передачи данных.

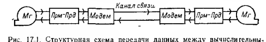


Рис. 17.1. Структурная схема передачи даных между вычислительными центрами.

М — магнитная лента; *Прм—Прд* — приемопередатчик.

К устройствам ввода относятся электрические пишущие машинки, сопряженные с перфоратором, перфолентные и перфокарточные трансмиттеры, пульты-манипуляторы, телеграфные аппараты, первичные преобразователи с памятью и т. д.

Устройства сбора информации отличаются от устройств первичного ввода информации тем, что имеют ряд входов, соединенных с первичными преобразователями, находящимися на расстоянии не более примерно 1 км, и выполняют функции сбора и концентрации информации. При последовательной записи на машинном носителе информации от ряда источников записывают адрес источника и время. Такие устройства могут иметь на расстоянии от пункта сбора несколько пишущих машинок и общий перфоратор.

Устройства для предварительной обработки информации. Эта операция включает в себя перекодирование информации с целью оптимальной ее передачи и обработки, добавление разделительных и других служебных знаков, например начала и конца передаваемого кодового блока, группы, конца строки, сигнала об изменении кода и т. д.

Конструктивно устройства могут быть выполнены в виде отдельного блока или совмещены с устройствами передачи данных.

Аппаратура передачи данных по каналу связи со скоростью примерно от 50 до 2400 Бод и более. В связи с тем что в ЭВМ допускается вероятность появления ошибки примерно 10^{-6}—10^{-8}, а в реальных каналах связи—во много раз большая (10^{-3}—

10^{-5} по искажению единичного символа), во всех устройствах ПД применяется несколько методов борьбы с помехами (ошибками).

Широко используются устройства модемы (модуляторы-демодуляторы, см. § 9.4) с частотной и фазовой модуляцией, анализирующие принимаемые импульсы и вырабатывающие защитный отказ в приеме импульсов, отличающихся от заданных по амплитуде и длительности или (и) корректирующие их.

Применяются коды с обнаружением ошибок, например, с решающей обратной связью по *обратному* каналу. *Широко применяются* корректирующие циклические, итеративные и другие коды. Для обнаружения и исправления ошибок устройства ПД имеют буферную память. По рекомендации МККТТ информация разделяется по блокам длиной 240, 480 и 960 импульсов и защищается циклическим кодом.

Устройства передачи данных работают в режиме симплексной (односторонней), дуплексной (параллельной двусторонней) и полудуплексной (поочередной двусторонней) связи. При симплексной передаче требуется один односторонний канал связи, при дуплексной — два (один в одну сторону и второй в обратную), а при полудуплексной — один двусторонний канал.

Устройства для согласования работы ЭВМ с устройствами передачи данных и телемеханики. Эти устройства (см. § 17.4) предназначены для синхронизации и согласования скорости работы ЭВМ, устройств телемеханики и передачи данных. Они оформляются конструктивно в виде выделенных устройств или их функции могут выполнить устройства передачи данных.

Устройства для вывода данных. К ним относятся перфораторы, устройства записи на магнитной ленте, электрические автоматические машинки, дисплеи и др. Вывод информации может быть в отпечатанном на бланке виде. Во многих случаях эти устройства совмещаются с устройствами ввода.

Комплекс устройств передачи данных может работать по выделенному, коммутируемому каналу связи или совместно с системой телемеханики. В последнем случае коммутация осуществляется системой телемеханики, а устройства передачи данных входят в систему телемеханики. При этом устройства передачи данных передают производственно-статистическую информацию в буквенно-цифровой форме. По рекомендации МККТТ все устройства передачи данных разделяются по скорости на три группы:

1) низкоскоростные с типовыми скоростями передачи 50, 100 и 200 бит/с, использующие телеграфные каналы связи или работающие совместно с системой телемеханики;

2) среднескоростные со скоростями 200, 600, 1200, 2400, 4800 и 9600 бит/с, работающие по телефонным каналам связи;

3) высокоскоростные для обмена информацией между вычислительными центрами со скоростью передачи 12 000, 24 000, 48 000, 72 000 и 96 000 бит/с, использующие широкополосные каналы связи. Они работают во многих случаях по автоматическому запросу вычислительного центра и передают информацию с магнитной ленты на магнитную ленту (рис. 17.1).

При использовании телеграфных каналов функции устройства модем выполняет аппаратура тонального телеграфирования. На вход устройств передачи данных информация подается обычно в двухпозиционных кодах, и они передают ее без изменения по форме, т. е. на выход АПД информация выдается в том же коде.

17.2. АППАРАТУРА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Одной из широко применяемых АПД является АПД типа «Аккорд 1200», работающая по выделенным или коммутируемым телефонным каналам связи со скоростями 600 и 1200 Бод. Скорость передачи по

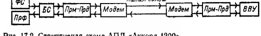


Рис. 17.2. Структурная схема АПД «Аккорд 1200»

ФС — фотосчитыватель; *Прф* — перфоратор, *БС* — блок синхронизации; *Прм—Прд* — приемопередатчик, *ВВУ* — вводно-выводное устройство

обратному каналу составляет до 75 Бод. По информационному каналу 0 и 1 передаются на частотах 2100 и 1300 Гц соответственно, а по обратному—на частотах 450 и 390 Гц (частотная модуляция). Дальность действия определяется допустимым запаздыванием в канале связи и может превышать 1000 км.

Структурная схема АПД «Аккорд 1200» приведена на рис. 17.2. Информация считывается фотосчитывателем *ФС* и передается с перфоленты. Она может быть также записана на перфоленту *Прф* и *ВВУ* или подана на ЭВМ через согласующее устройство (см. § 17.4).

Типовой полукомплект устройства «Аккорд 1200» состоит из ленточного перфоратора *Прф* типа ПЛ-150, фотосчитывающего устройства *ФС* типа ПЛ-1500, приемопередатчика данных *Прм—Прд*, стола оператора и телефонного аппарата. Вызов абонента производится с помощью телефонного аппарата. После договоренности по телефону оператор включает автоматическую передачу данных путем фотосчитывания с перфоленты. В любой момент или после окончания передачи данных каждый оператор может перевести аппаратуру в режим телефонной связи путем нажатия клавиша.

В устройстве защиты от ошибок повышение помехоустойчивости осуществляется параметрическим и кодовым способами. Параметрическая защита от ошибок достигается с помощью модемов, контролирующих и корректирующих амплитуду, длительность и смещение принимаемых импульсов относительно их середины, и описана в § 9.4.

Рассмотрим кодовое устройство защиты от ошибок аппаратуры «Аккорд 1200 ПП», выполненное в соответствии с рекомендациями МККТТ [60]. Его упрощенная схема приведена на рис. 17.3. Аппаратура передачи данных рассчитана для совместной работы с «Модем-1200» при линейной скорости передачи 1200 Бод. Для обнаружения ошибок

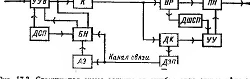


Рис. 17.3. Структурная схема защиты от ошибок аппаратуры «Аккорд 1200 ПП».

используется циклический код с образующим полиномом: $P(x) = x^{16}+x^{12}+x^{5}+1$ (см. гл. 3).

Суммарная длина иодовой комбинации 260 разрядов, из иоторых 240 информационных, 16 проверочных (контрольных) и 4 служебных, вырабатываемых в устройстве повышения достоверности первичным преобразователем служебного прязнака ДСП.

От источника информации *ИИ* информация поступает блоками по 240 разрядов в устройство управления вводом *УУВ*. Предусматривается возможность ввода информации в *УВВ* параллельно-последовательным способом по 5—8 параллельным цепям. Из *УУВ* информация поступает в кодирующее устройство *К* и далее в прямой канал. Информационная часть кодовой комбинации хранится в буферном накопителе *БН* до получения сигнала подтверждения или запроса по обратному каналу

На приемной стороне (справа) информация поступает в декодер *ДК* и одновременно через входной регистр *ВР* на дешифратор служебного прязнака *ДШСП* и приемный накопитель *ПН*. После декодирования при отсутствии ошибок в датчике запроса и подтверждения *ДЗП* вырабатывается кодовая комбинация подтверждения, которая по обратному каналу передается на передающую станцию в анализатор запроса *АЗ* и блок накопителя *БН*. При возникновении ошибки формируется кодовая комбинация запроса. Одновременно из кодовой комби-

нации выделяется служебный признак в виде четырех разрядов, а оставшаяся информационная часть из блока *БН* поступает в накопитель *УУВ* и далее в кодирующее устройство и прямой канал связи к получателю информации *ПИ*. Управление приемным устройством осуществляется блоком УУ. Устройство повышения достоверности обеспечивает вероятность ошибки знака не более 10^{-8} при вероятности ошибки импульсного элемента не более $2\cdot10^{-4}$. Память блока *БН* рассчитана на два блока.

Приемный полукомплект синфазируется по передающему автоматически в начале цикла или при сбоях фазы. Для этого с передающей стороны посылается блок фазирования, состоящий из четырех служебных, 60 комбинаций заполнителя и 16 фазирующих символов. Фазирование производится по комбинации заполнителя, имеющей большое число переходов 0⟶1 и 1⟶0.

Устройство «Аккорд 1200» в нескольких модификациях широко применяется в связи для передачи данных, несмотря на то что оно относится к устаревшим разработкам и снято с производства на заводах.

В многофункциональных системах телемеханики и управляющих вычислительных телекомплексах (УВТК) применяется АПД на интегральных микросхемах главным образом типа АПД-Микро А и АПД-микро Д. В состав АПД-Микро А входит аппаратура АПД-МА-ТГ,

Тип АП	Шифр ЕС ЭВМ	Тип канала связи	Скорость передачи, бит/с	Вид устройства преобразования сигналов
АП-1	8501	Некоммутируемые ТФ и ТГ, коммутируемые ТФ	50, 75, 100, 200	«Модем-200»
АП-2	8502	Некоммутируемые и коммутируемые ТФ и ТГ	50, 75, 100, 200	«Модем-200», УПС-ТГ
	8502	То же	200	УПС-ТГ, УПС-НУ
АП-3	8503	Некоммутируемые и коммутируемые ТФ	600, 1200	«Модем-1200», УПС-НУ
АП-11	8511	Некоммутируемые ТФ	1200, 2400	«Модем-2400»
АП-64	8564	Некоммутируемые ТФ и ТГ	200, 600, 1200, 2400, 4800	«Модем-200», «Модем-1200», «Модем-2400»
АП-70	8570	Некоммутируемые ТФ и ТГ, коммутируемые ТФ	100	«Модем-200»
	8570	То же	100	«Модем-200»

состоящая из устройства преобразования сигналов УПС-2 и устройства защиты от ошибок УЗО-МА. Аппаратура предназначена для работы по выделенным телеграфным каналам, например, организованным по четырехпроводным цепям.

Устройство преобразования сигналов УПС-2 преобразует сигналы двоичной последовательности (двухпозиционные) в телеграфные посылки при передаче, производит обратное преобразование при приеме и работает по синхронному принципу. Оно выполняет функции модема (см. § 9.4) и может быть заменено на УПС-1.

Совместная работа АПД-Микро с ЭВМ в комплексах АСВТ-М и «Экран-М» осуществляется с помощью групповых устройств (концентраторов, см. § 19.4) по радиальным каналам (до четырех АПД) и по магистральному (до восьми АПД). Групповые устройства комплекса «Экран-М» позволяют совместно работать АПД-МА с ЭВМ Единой системы. Аппаратура АПД-МА может работать и сопрягаться с устройствами ввода-вывода, предназначенными для считывания информации с перфоленты типа СП-4П, для регистрации информации на перфоленту перфоратором типа ПЛ-150П и с устройствами для подготовки и распечатки перфоленты с помощью пишущей машинки «Консул-260».

Аппаратура АПД-МА-ТГ работает со скоростями 50, 75, 100 и 200 бит/с. Время синхронизации на скорости 50 бит/с составляет 2,4 с,

Таблица 17.1

Способ передачи	Режим работы	Помехоустойчивый код	Длина блока	Страна-изготовитель
Асинхронный	Симплекс, полудуплекс	Матричный	Переменная, максимальная, определяется длиной строки	НРБ
Синхронный	То же	»	Переменная, 15, 30, 45 знаков	СССР
»	Полудуплекс	Циклический $x^{16}+x^{12}+x^5+1$	240 или 260 бит	ВНР
»	»	То же	240 или 260 бит	ВНР
»	Симплекс, полудуплекс	» »	Максимальная, 256 знаков	СССР
Асинхронный	То же	Матричный	Переменная, максимальная, определяется длиной строки	ВНР
»	» »	»	То же	СССР
»	» »	»	» »	ВНР

Рабочий уровень выходного сигнала ±20 или ±60 В. Аппаратура построена на интегральных микросхемах серий К-133 и К-140. Питание осуществляется от сети переменного тока 220 В.

Другая модификация аппаратуры типа АПД-МА-ТФ также входит в состав АПД-Микро А и передает буквенно-цифровую информацию с большим диапазоном скоростей и по различного типа каналам связи (коммутируемым или выделенным городским и международным телефонным каналам). Приемопередатчик АПД работает в полудуплексном режиме с участием оператора на двух оконечных пунктах, с участием одного оператора или без операторов.

В состав АПД-МА-ТФ входят преобразователь сигналов УПС-1 и устройство защиты от ошибок УЗО-МА, между которыми осуществляется стандартное сопряжение УЗО-МА, состоящее из блоков управления, кодера-декодера, блока памяти и кварцевого генератора Оно реализует алгоритмы приема—передачи информации, защиты от ошибок, которые возникают при передаче сигналов по каналу связи, и алгоритм обмена информацией с оконечным оборудованием.

Аппаратура имеет два рабочих состояния: «переговоры» и «данные» Переход от одного состояния в другое осуществляется вручную или автоматически при приеме вызывного сигнала в необслуживаемом режиме работы. Предусматриваются служебные знаки квчала и конца комбинаций и знак передачи сигнала обратной связи. Есть возможность магистрального подключения до восьми АПД к одному оконечному пункту путем введения дополнительных цепей к стандартного сопряжения или работы АПД в режиме массив—диалог по сигналам с оконечного пункта. При радиальном включении АПД и работе в одном режиме дополнительные цепи не используются.

Аппаратура АПД-МА-ТФ имеет скорость передачи 10 К байт/с при длине коаксиального кабеля до 50 м и 1 или 2 К байт/с при длине телефонного кабеля до 500 м. Максимальная дальность передачи 14 000 км. Вероятность искажения знака 10^{-7} при использовании циклического кода и 10^{-6} при использовании итеративного кода. Элементной базой являются интегральные микросхемы К-133 и К-140.

Для ЕС ЭВМ разработана аппаратура передачи данных типа АП-1—АП-70 с различной скоростью и разными условиями и режимами работы. Ее элементная база — интегральные микросхемы. Алгоритмы работы во всех АП—решающая обратная связь с ожиданием квитанции. В табл. 17.1 приведены основные характеристики некоторых АП с низкой и средней скоростями передачи.

17.3. СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ЭВМ

В последние годы в СССР и за рубежом быстро развиваются разнообразные системы обслуживания с запросом и ЭВМ и ответом ЭВМ

на расстоянии через АПД по каналу связи. Вводно-выводные устройства в таких системах могут выполняться в виде специальных пультов оператора, как, например, в системах продажи билетов на самолеты («Сирена»), на железнодорожные поезда («Экспресс»), резервирования мест в гостиницах и т. д. При этом ответ печатается на специальном бланке в виде документа с материальной ответственностью.

Развивается обслуживание организаций и частных лиц путем обращения с запросом к ЭВМ с автоматическим ответом ЭВМ на расстоянии через АПД. Запрос может иметь характер математической, логической и диагностической задачи, справки о биржевых бумагах и другие справки. Такие системы в ближайшем будущем получат широкое внедрение.

Ограничимся рассмотрением некоторых частных вопросов. В системах обслуживания с ЭВМ применяются устройства без предварительного накопления информации на ленте. Запросы и необходимые данные накапливаются в небольшом оперативном запоминающем устройстве и передаются по мере их возникновения по каналу связи в ЭВМ для обработки, а результат обработки автоматически посылается пользователю (потребителю). К такому классу относятся системы для резервирования мест и продажи билетов, для решения задач на ЭВМ по компаундированию нефтепродуктов заданного сорта на нефтебазах из различных составляющих и др. Информация запроса (заказа) и ответа передается по каналу связи кодовыми блоками определенной длины, при этом требуется высокая достоверность принятой информации.

Для таких условий с учетом сравнительно небольшой средней длины кодовых блоков заказа и ответа (для системы «Сирена» 200—460 бит и для системы «Экспресс» 180—340 бит), а также необходимости наличия паузы между заказом и ответом на время обработки информации на ЭВМ одним из эффективных способов является передача обратных сигналов решающей обратной связи по телефонному (а не телеграфиому) каналу связи с коммутацией его на время передачи команд. Этот метод позволяет упростить аппаратуру путем исключения приемника и передатчика обратного канала, работающих на малой скорости (до 75 Бод), и уменьшить перекрестные искажения и взаимное влияние каналов.

Однако такой метод имеет недостаток, состоящий в снижении эффективности передачи при переспросах из-за необходимости дополнительной коммутации канала связи. Приводимые ниже расчеты показывают незначительное снижение эффективности.

Среднеэффективная скорость передачи

$$V_э = V_0 \frac{m(1 - P_{оп})}{n + 2\alpha_з - 2\alpha_к}, \qquad (17.1)$$

где V_0 — скорость модуляции сигнала; m — число информационных раз-

рядов в блоке; n — общая длина кодового блока; $\alpha_к$ — число тактов, необходимое для окончания переходных процессов в фильтрах канало-образующей аппаратуры; $\alpha_з$ — число тактов, определяемое запаздыванием сигнала в канале связи: $P_{ош}$ — вероятность ошибки.

Вероятность ошибки любой кратности в кодовом блоке длиной n разрядов

$$P_{ош} = nP_0 2\frac{1-K}{2-K}, \qquad (17.2)$$

где P_0 — вероятность одиночной ошибки; K—коэффициент корреляции между ошибками (для некоммутируемого канала K=0,2, для коммутируемого K=0,8).

Относительное снижение эффективности передачи из-за коммутации канала связи

$$\delta V_э = (V_{э1} - V_{э2})/V_0, \qquad (17.3)$$

где $V_{э1}$, $V_{э2}$ — эффективные скорости передачи без учета и с учетом коммутации. Из (17.1) и (17.3) получим:

$$\delta V_э = m(1-P_{ош})\left(\frac{1}{n+2\alpha_з} - \frac{1}{n+2\alpha_з+\alpha_к}\right), \qquad (17.4)$$

где $\alpha_з = lV_0/V$ —коэффициент, характеризующий запаздывание; l — длина канала связи, км; V — скорость распространения колебаний в канале связи (для смешанных радиорелейных и кабельных каналов $V \approx 200 \cdot 10^3$ км/с).

Из расчетов следует, что коммутация канала практически не снижает эффективной скорости передачи.

Переход на коммутацию обратного канала с решающей обратной связью имеет особенности синфазирования из-за приема кодов команд со случайной фазой. В связи с этим для систем резервирования мест и продажи билетов на транспорте принята структура сигналов обмена информацией, приведенная на рис. 17.4.

Аппаратура пункта обслуживания *ПО* и вычислительной машины ЭВМ при отсутствии запроса обменивается служебными кодами «готов к приему» *ГП*, которые синфазируют аппаратуру (рис. 17.4, *а*). При возникновении запроса с пункта обслуживания *ПО* посылается код «готов к передаче» *ГПД* вместо *ГП*, в ответ на который *ЭВМ* посылает код *ГП* (рис. 17.4, *б*). После этого с пункта обслуживания передается информационный блок, начинающийся служебным кодом «старт», затем «текст», конец текста *КС* и заканчивающийся корректирующими разрядниками *КР*.

Принятый блок в ЭВМ анализируется, затем вырабатывается сигнал «верно» или «повторить». Для сокращения числа служебных кодов

сигнал «верно» передается кодом *ГПД*, а сигнал «повторить»— кодом *ГП* (рис. 17.4, *в* и *г*). При приеме команды «повторить» *ПО* повторяет передачу того же блока заказа. В процессе выполнения заказа *ЭВМ* посылает код *ГПД*, в *ПО* отвечает кодом *ГП* (рис. 17.4, *д*). При выполнении заказа *ЭВМ* вместо кода *ГПД* передает кодовый блок ответа, начинающийся кодом «старт», затем — «текст», конец сообщения *КС* и корректирующие разряды *КР* (рис 17.4, *е*). После этого пункт обслуживания анализирует принятую информацию и посылает сигнал «верно» *ГПД* или «повторить» *ГП*. После окончания обслуживания *КП* и *ЭВМ* входят в режим обмена кодами *ГП* (рис. 17.4, *ж*).

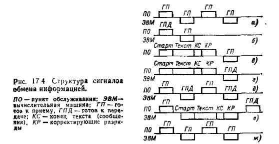


Рис. 17.4 Структура сигналов обмена информацией.

ПО — пункт обслуживания; *ЭВМ* — вычислительная машина; *ГП* — готов к приему, *ГПД* — готов к передаче; *КС* — конец текста (сообщения), *КР* — корректирующие разряды

В аппаратуре передачи данных типа *АПД*-1V в системе резервирования и продажи авиабилетов «Сирена» имеется пульт ручного ввода с клавиатурой и электронно-лучевой трубкой для визуального контроля оператора-кассира с одной стороны канала связи и линейный адаптер, связанный с *ЭВМ* комплекса АСВТ,—с другой. Передача информации осуществляется блоками переменной длины до 2048 бит. Применяется циклический код с разрешающей обратной связью и числом контрольных разрядов, равным 15. Кодирование букв и цифр осуществляется 8-разрядными знаками по ГОСТ 13052-74.

Коррекция ошибок, возникающих из-за помех в канале связи или сбоев устройства ввода-вывода, достигается методом обратной связи. При выявлении ошибки на приемной стороне автоматически переспрашивается весь блок. Аппаратура передачи данных работает в режиме оперативного полудуплекса. Во время ожидания информации непрерывно передаются служебные сигналы для автоматического поддержания синфазности тактовых генераторов (рис. 17.4).

Скорость передачи данных составляет 600 и 1200 Бод. Вероятность искажения знака равна не более 10^{-7} при вероятности искажения элемента сигнала 10^{-3}. Каналы связи — телеграфный и телефонный. Телефонный канал может быть постоянным или коммутируемым, городским или междугородным. Перекрываемое затухание в канале связи 34, 72 дБ (4 Нп) на частоте 800 Гц.

17.4. УСТРОЙСТВА СОПРЯЖЕНИЯ С ЭВМ

Устройства сопряжения ЭВМ с системой телемеханики, а в некоторых случаях и передачи данных выполняют все или часть следующих функций·

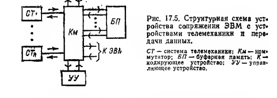


Рис. 17.5. Структурная схема устройства сопряжения ЭВМ с устройствами телемеханики и передачи данных.

СТ — система телемеханики; *Км* — коммутатор; *БП* — буферная память; *К* — кодирующее устройство; *УУ* — управляющее устройство.

согласование скорости работы системы телемеханики и ЭВМ, так как скорость обработки информации в ЭВМ во много раз больше скорости передачи в канале телемеханики. С этой целью устройство сопряжения оборудуется буферной памятью, к которой в нужный момент времени обращается ЭВМ и считывает информацию с требуемой повышенной скоростью;

установление очередности ввода информации в ЭВМ и согласование интервала времени работы ЭВМ с работой данной системы телемеханики и передачи данных.

Для повышения эффективности использования ЭВМ она во многих случаях работает с несколькими системами телемеханики, устройствами передачи данных и другими источниками и приемниками информации (ЭВМ может работать в режиме разделения времени). Устройство сопряжения при этом устанавливает приоритет различных входных и выходных сигналов, что повышает эффективность использования ЭВМ.

Пример структурной схемы устройства сопряжения приведен на рис. 17.5. Системы телемеханики и другие источники и приемники информации $CT_1,...,CT_n$ подключаются к ЭВМ через коммутатор Км и буферную память *БП*. При необходимости информация перекодируется кодирующим устройством *К*. Всей коммутацией и распределением сигналов управляет управляющее устройство *УУ*, устнавливающее приоритет и последовательность работы.

Так, устройство сопряжения записывает информацию, поступающую из *i*-й системы телемеханики в буферную память *БП*, и по сигналу ЭВМ информация из *БП* по команде управляющего устройства *УУ* переписывается в оперативную или долговременную память ЭВМ.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ВНЕДРЕНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ГСП

18.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГСП

Широко развивающаяся автоматизация производственных процессов и научных экспериментов на земле, в океане, атмосфере и космосе требует удовлетворения возрастающей потребности в современных все более совершенных и сложных приборах и информационных системах. Решение этих задач невозможно путем разработки специализированных приборов и систем, удовлетворяющих конкретным индивидуальным требованиям, из-за резко возрастающего числа и разнообразия приборов. Такой путь приводит к уменьшению серийности производства и к резкому увеличению номенклатуры. Одновременно резко возрастает стоимость технических средств.

Удовлетворение основных потребностей народного хозяйства в технических средствах автоматизации должно базироваться на создании научно обоснованных агрегатированных комплексов и рядов технических средств, которые могут взаимно сочленяться между собой и функционировать в различных комбинациях. С этой целью предусматривается унификация сигналов, метрологических, надежностных, энергетических и других характеристик и математического обеспечения.

В конструкциях технических средств должен быть применен блочно-модульный принцип построения с использованием современной технологии, одним из главных направлений которой являются интегральные микросхемы, микро-ЭВМ и микропроцессоры.

Технические средства ГСП разделяются по функциональному признаку на агрегатированные комплексы средств с информационной, метрологической, конструктивной и эксплуатационной совместимостью. К таким комплек-

сам средств относятся агрегатные средства вычислительной техники (АСВТ), агрегатные средства контроля и регулирования (АСКР), агрегатная система средств телемеханики (АССТ), агрегатные средства хронометрической техники (АСХТ), агрегатные средства организационной техники (АСОТ), агрегатные средства программного управления (АСПУ), агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники (АСЭТ) и др.

Каждая из перечисленных ветвей ГСП представляет собой набор типовых функциональных узлов и блоков для построения на их основе устройств и систем. Функциональные блоки и устройства данной и других ветвей ГСП должны сопрягаться по единому интерфейсу (система сопряжений между устройствами и блоками).

Применение единого интерфейса ЕИ-1 [45], описанного в § 18.4, и других специализированных интерфейсов обеспечивает условия стыковки блоков и устройств агрегатных средств данной ветви и унификацию их связей с другими ветвями агрегатных средств ГСП с ЭВМ и микропроцессорами в различных их комбинациях при создании информационных комплексов. Принято считать, что функциональный блок ГСП выполняет законченную функцию и сопрягается с другими функциональными блоками по единому интерфейсу. Функциональный узел может не удовлетворять требованиям сопряжения по единому интерфейсу.

В СССР работы по созданию ГСП начаты в 1960 г., а в 1961 г. было принято решение о создании международной универсальной системы автоматического контроля, регулирования и управления стран СЭВ, названной УРС. В настоящее время работы по созданию УРС заканчиваются и система принята странами — членами СЭВ.

18.2. АГРЕГАТНЫЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Ветвь АСЭТ состоит из функционально и конструктивно законченных устройств, образующих ряды однотипных по выполняемым функциям устройств, отличающихся между собой основными характеристиками.

Конструктивно устройства АСЭТ построены на основе модульных и микромодульных элементов общего применения и специальных элементов. Агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники состоит из следующих групп устройств, различающихся по выполняемым функциям

сбора и преобразования информации;
измерения и отображения информации;
обработки и хранения информации;
управления и формирования управляющих воздействий;
вспомогательных;
автономных приборов и устройств.

Устройства сбора и преобразования информации включают в себя первичные и измерительные преобразователи электрических и магнитных величин, электрические измерительные преобразователи, такие, как измерительные усилители, функциональные преобразователи постоянного тока и модуляторы, коммутаторы, преобразователи цифровых кодов и цифро-аналоговые преобразователи.

Устройства измерения и отображения информации включают в себя аналого-цифровые преобразователи с различными входными и выходными величинами, электроизмерительные приборы, в том числе аналоговые, цифровые показывающие и регистрирующие.

Устройства обработки и хранения информации включают в себя устройства дискретизации, определения динамического диапазона и областей измеряемого сигнала, сжатия информации, определения величин, связанных функционально с измеряемыми, аналоговые и цифровые специализированные и запоминающие устройства.

К устройствам управления и формирования управляющих воздействий относятся программные устройства, устройства управления выбором метода измерения, повышения помехоустойчивости, коррекции характеристик и т. д.

Агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники позволяет создавать аналоговые и цифровые информационно-измерительные системы (ИИС) с параллельным, последовательным и параллельно-последовательным сбором и распределением информации, использующие различные методы автоконтроля и измерений путем соответствующего набора функциональных блоков и устройств.

В АСЭТ предусматривается метрологическое обеспечение с различными критериями, методами нормирования метрологических характеристик, а также методами и средствами аттестации и проверки устройств

18.3. АГРЕГАТНАЯ СИСТЕМА СРЕДСТВ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Агрегатная система средств телемеханики предназначается для передачи на расстояние оперативно-технологической и производственно-статистической информации в диспетчерских системах контроля и управления и в АСУ различных отраслей народного хозяйства с территориально разобщенными объектами*.

* Применительно к элементной базе четвертого поколения система АССТ переименована в систему АСТТ (см табл. 18.2).

Агрегатная система средств телеизмерения состоит из набора типовых функциональных узлов и блоков, выполненных в основном на интегральных микросхемах, и построенных на их базе комплексов телемеханических устройств. Эти комплексы выполняют функции передачи и приема информации, а также простейшей ее обработки на ПУ и КП.

На КП источниками информации являются разнообразные первичные преобразователи измеряемых параметров, первичные преобразователи состояния объектов (сигнализации), машинные носители информации (на перфоленте, перфокартах и др.), устройства ручного ввода информации, сама аппаратура КП и ЭВМ.

На ПУ источниками информации может быть пульт с ключами и другими элементами управления двухпозиционными и многопозиционными объектами, задатчики уставок автоматических регуляторов, машинные носители, ЭВМ и дисплеи.

Приемниками информации на ПУ являются различные приборы на щите и пульте диспетчера или оператора, ЭВМ, дисплей и машинные носители информации.

В АССТ приняты следующие принципы построения:

система приоритетов для различных видов информации с соответствующим разделением во времени при ее передаче;

система приоритетов для различных КП с соответствующим во времени их обслуживанием;

адресно-групповой метод передачи информации, обладающий широкими возможностями выбирать и изменять различное число КП, объемы и виды передаваемой информации;

спорадические методы передачи дискретной и непрерывной информации;

обработка информации устройствами для обработки, входящими как в отдельные ветви ГСП, так и в ЭВМ;

построение устройств с учетом особенностей используемых каналов связи (КС);

унификация сопряжений;

унификация конструктивной базы;

агрегатирование технических средств.

Перечисленные принципы построения АССТ позволяют:

сопрягать блоки и устройства АССТ с устройствами других ветвей ГСП;

разрабатывать различные устройства телемеханики из ограниченного набора функциональных блоков;

увеличивать серийность производства и сокращать стоимость аппаратуры путем централизованного производства функциональных блоков с типовыми конструкциями;

сокращать объем и сроки разработки и проектирования и упрощать эксплуатацию устройств телемеханики.

Все функциональные блоки АССТ делятся на следующие группы: источники информации;

приемники информации;

приемники-источники,

централи-блоки режима работы, выполняющие функции управления и координации, позволяющие приемникам и источникам работать асинхронно.

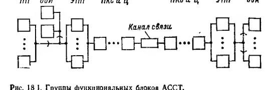


Рис. 18.1. Группы функциональных блоков АССТ.

Функциональные блоки подразделяются также на инициативные и неинициативные. Инициативные блоки-источники формируют сигнал запроса связи и содержат узлы наличия информации. Блоки-источники могут работать в неинициативном режиме по команде, поступающей на вход блока. К инициативным блокам относятся также блоки-приемники, формирующие сигнал запроса связи, например, при обнаружении искажений в принятой информации.

Все функциональные блоки разделяются по выполняемым функциям на следующие группы блоков, размещаемых на КП и ПУ:

первичные преобразователи (ПП) (рис. 18.1);

преобразователи кодов и сигналов (ПКС) для передачи и приема информации;

управления передачей и приемом отдельных видов информации (УПП);

обработки и отображения информации (ООИ);

режима работы (РР), определяющие алгоритмы устройства (Ц — централи).

Структурная схема включения блоков на КП к ПУ приведена на рис. 18.1.

К ПКС относятся модемы для передачи и приема сигналов при работе по каналу связи, узлы тактовой синхронизации, блоки повышения

достоверности, преобразователи последовательного кода в параллельный, устройства памяти.

Блоки УПП включают в себя управление информацией ТУ, ТС, ТИИ, ТИТ, ПСИ и КК (кодовые команды). К этим блокам относятся устройства сопряжения с ЭВМ.

К блокам ООИ относятся преобразователи кодов, например двоичного в двоично-десятичный, цифро-аналоговые преобразователи, блоки масштабирования, сравнения кодов, цифровой индикации, управления цифровой регистрацией, управления фотосчитывателем, управления перфоратором, воспроизведения сигналов состояния объектов для мнемического и светового табло.

Блок РР координирует работу всех блоков, объединенных в устройство, реализует выбранную систему приоритетов, устанавливает связь между блоками по заданной программе, контролирует заданную дисциплину передачи информации по каналу связи, формирует сигналы общей неисправности устройства и тактирующие сигналы для всех блоков.

В АССТ также входят ряд вспомогательных узлов, таких, как генераторы тактовых импульсов, распределители импульсов, усилители для выхода на реле и лампы накаливания и т. п. Предусмотрено и возможное расширение блоков АССТ. Генераторы тактовых импульсов рассчитаны на фиксированные типовые скорости передачи информации по каналу связи 50, 100, 200, 300, 600 и 1200 бит/с.

18.4. ИНТЕРФЕЙС

Вопросы информационной, метрологической, конструктивной, эксплуатационной, математической, энергетической и другой совместимости внутри каждой ветви ГСП, ветвей ГСП между собой, ЭВМ с микропроцессорами в информационных комплексах связаны со значительными трудностями и полностью еще не разрешены. Согласование между собой различных устройств и функциональных узлов осуществляется при помощи унифицированной системы взаимосвязи — интерфейса.

Интерфейс задает условия совместимости входящих в систему устройств, в частности номенклатуру сигналов и команд, алгоритмы обмена информацией, структуру системы, формат передаваемых чисел, условия электрической, конструктивной и другой совместимости. Он представляет собой совокупность унифицированных шин для передачи информации, унифицированных электронных схем для управления прохождением сигналов по этим шинам и алгоритмов управления обменом информацией, а также требо-

ваний, предъявляемых к сигналам. Для интерфейса выделяются платы, располагаемые в модулях и блоках.

Различают три основных вида структур интерфейсов: **каскадный, радиальный и магистральный**, отличающиеся главным образом структурой шин [62]. В наиболее простых системах применяется **каскадный** (цепочечный) **интерфейс** с последовательной логикой включения отдельных блоков системы обмена информацией при фиксированном числе блоков и их расположении. Все функциональные блоки включаются последовательно и соединены попарно линиями. При этом блоки, управляющие обменом информацией, называемые контроллерами, и специальные интерфейсные команды для связи блоков системы отсутствуют.

При **радиальной структуре** интерфейса все внешние устройства подключаются к ЭВМ через контроллер, который управляет обменом информацией в системе. Весь обмен информацией происходит только между контроллером и функциональным блоком и выполняется по команде контроллера или по инициативе блока. В такую систему обмена информацией вводятся приоритеты для установления дисциплины работы при возникновении нескольких запросов до их обслуживания (очереди). Для радиальной структуры необходимо иметь большую протяженность линий связи, и в связи с этим такой интерфейс применяется при сравнительно небольшом числе блоков.

При **магистральной структуре** интерфейса применяется система коллективных шин в виде магистралей, к которым подключаются контроллеры и все блоки. Такой интерфейс обладает наибольшей гибкостью и получил наиболее широкое применение. Обмен информацией может осуществляться по команде контроллера или по запросу блока, но одновременно только между двумя блоками. При этом контроллер проверяет, свободна ли система шин и нет ли запроса другого блока, а при положительном ответе дает команду на связь. Система приоритетов для такого интерфейса также обязательна.

Ряд ветвей ГСП имеет единый интерфейс ЕИ-1 [45], рассчитанный на информационный обмен как параллельными, так и последовательными кодами при магистральной, радиальной и цепочечной структурах соединений между функциональными блоками для текстов сообщений, ограниченных шестнадцатью двоичными разрядами с соответствующей предельной точностью измерений. В подав-

ляющем большинстве информационных систем промышленного назначения указанные ограничения допустимы.

Для перечисленных ограничений единый интерфейс ЕИ-1 устанавливает номенклатуру сигналов и алгоритмов обмена информацией между функциональными устройствами и блоками агрегатных средств АСЭТ, АССТ, АСПИ, АСКР и КТС ЛИУС.

Необходимость в едином интерфейсе возрастает при создании многофункциональных устройств и систем с самой разнообразной структурой соединения функциональных блоков и неограниченным числом сочленений при данной структуре.

При упорядочении сигналов все функциональные блоки разделяются на источники и приемники информации. В табл. 18.1 приведена номенклатура типовых сигналов сопряжения в интерфейсе ЕИ-1 только для обмена информацией между блоками и устройствами.

Из перечисленных в табл. 18.1 сигналов для функциональных блоков-источников информации обязательными являются сигналы ВИ, ОИ и ИИ (подчеркнуты), для блоков-приемников информации — ВП, ОП и ИП (подчеркнуты). Кроме того, для централей (блоков режима работы) обязательны сигналы ВИ, ОИ и ОП. При использовании магистральной структуры линий связи обязательны только сигналы АИ и АП, а для радиальной и цепочечной структуры такие сигналы не используются. Сигналы запроса связи ЗП вырабатываются только инициативными блоками.

В информационной системе или комплексе систем на функциональные блоки могут поступать тактирующие и стробирующие сигналы для подготовки информации к передаче, сигналы проверки состояния узлов и блоков, сигналы от первичных преобразователей и т. п. Сигналы, выдаваемые на индикаторы, регистраторы и другие средства отображения информации, не должны влиять на процесс обмена информацией между блоками по типовым алгоритмам.

В соединительных цепях между блоками запрещается применение дополнительных сигналов, требующих изменения алгоритмов работы других, связанных с ними блоков и ограничивающих возможности применения устройств.

В начале работы блока — источника информации на его вход поступает сигнал УИ, устанавливающий необходимые элементы блока в исходное состояние. Установка

Таблица 18.1

Обозначение сигнала	Наименование сигнала	Характеристика сигнала	Количество шин для сигнала
		Выходные сигналы источника	
ВИ	Вызов источника	Сигнал, определяющий начало работы источника	1
АИ	Адрес источника	Сигнал выбора конкретного источника	1
КИ	Команды источнику	Сигнал задания режима работы источнику (опрос состояния источников, команды выдачи одного из видов информации)	4
ОП	Ответ приемника	Сигнал, поступающий на источник при установлении связи с приемником	1
УИ	Установка источника	Сигнал приведения источника в исходное состояние (после включения питания, устранения неисправностей и т. п.)	1
		Выходные сигналы источника	
ЗИ	Запрос связи	Заявка на связь от индивидуального источника	1
ОИ	Ответ источника	Сигнал, подтверждающий установление связи с источником (используется в ряде случаев для вызова приемника)	1
СИ	Состояние источника	Сигналы, фиксирующие состояние источника (готовность или неготовность к выдаче данных, ошибка в данных и др.)	4
ИИ	Информация источника	Сигналы передачи данных [могут иметь защиту по паритету (побайтно)]	1, 4, 8, 16
НИ	Неисправность источника	Инициативный сигнал о неисправности источника	1
ОКИ	Контроль источника	Сигнал, фиксирующий наличие или отсутствие контроля данных	
		Входные сигналы приемника	
ВП	Вызов приемника	Сигнал, определяющий начало работы приемника	1
АП	Адрес приемника	Сигнал выбора конкретного приемника	1

Обозначение сигнала	Наименование сигнала	Характеристика сигнала	Количество шин для сигнала
КП	Команда приемнику	Сигнал задания режима работы приемнику (опрос состояния приемников, указание вида информации и т. п.)	4
ИП	Информация приемнику	Сигналы передачи данных; каждый байт может быть защищен по паритету	1, 4, 8, 16
УП	Установка приемника	Сигнал приведения приемника в исходное состояние	1
		Выходные сигналы приемника	
ОП	Ответ приемника	Сигнал, подтверждающий установление связи с приемником	1
СП	Состояние приемника	Сигналы, фиксирующие состояние приемника (готовность или неготовность к приему данных, защитный отказ и другие состояния приемника)	4
ЗП	Запрос связи	Заявка на связь от инициативного приемника	1
НП	Неисправность приемника	Инициативный сигнал, фиксирующий неисправность приемника	1

блока также производится при включении источников питания. Блок-схемы алгоритмов функциональных блоков-источников информации приведены на рис. 18.2, *а* и *б*.

При отсутствии сигнала ОИ на вход источника могут поступать сигналы ВИ, АИ и КИ. При выполнении этого условия на вход источника сначала подаются сигналы КИ и АИ, а потом ВИ, после которого источник воспринимает сигналы КИ. Затем, если источник готов к выдаче информации, он формирует внутренний сигнал готовности Г, по которому выставляются сигналы ИИ и СИ. Далее источник выдает сигнал ОИ.

При поступлении сигнала ОИ управляющий блок снимает сигнал ВИ, а затем КИ и АИ. После того как перечисленные сигналы сняты и завершен рабочий цикл, заканчивающийся формированием внутреннего сигнала «конец

цикла» (КЦ), источник должен был снять сигналы ИИ, СИ, а затем ОИ.

Для иллюстрации последовательности сигналов на рис. 18.3, *а* и *б* приведены временные диаграммы сигналов для неинициативного и инициативного источников параллельного кода в соответствии с рис. 18.2, *а* и *б*.

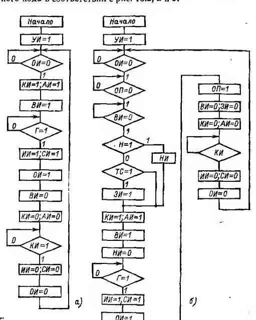


Рис. 18.2. Алгоритм работы функциональных блоков источников информации

Как отмечалось ранее, единный интерфейс ЕИ-1 разработан для различных информационных систем и устройств с относительно небольшим числом двоичных разрядов в передаваемых текстах (до 16 бит) при радиальной, магистральной и цепочечной структурах соединения устройств и передаче параллельными или последовательными кодами. Для больших информационных емкостей и больших скоростей передачи при взаимном обмене информацией между устройствами комплекса применяется принцип связей между блоками, получивший название КАМАК (CAMAC — computer application for measurments and controls).

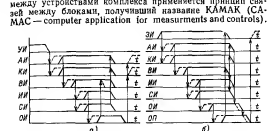


Рис. 18.3. Временные диаграммы работы неинициативного и инициативного источников параллельного кода.

КАМАК разработан Комитетом европейского стандарта по ядерной электронике, главным образом, для ядерных исследований. В последнее время КАМАК используется а сравнительно крупных системах при различных научных экспериментах. Для повышения быстродействия в КАМАК применяются магистральная структура и до 86 различных параллельных шин. Передача информации осуществляется параллельными кодами по 24 шинам магистрального канала связи (24 бит), а цикл передачи данных равен 1 мкс. Все другие шины предназначены для служебной информации. Основным звеном для обмена информацией служит секционное управляющее устройство (контроллер), распределяющее потоки информации.

Принятый в КАМАК модульный принцип построения при магистральном канале позволяет получить хорошие характеристики системы при сравнительно большом диапазоне ее основных показателей (гибкость), рационально построить документацию, сократить время проектирования

и т. д. Однако для некрупных информационных комплексов система КАМАК экономически нерациональна.

В интерфейсах ЕИ-1 и КАМАК в основном заложена идеология элементной базы третьего поколения, которая сводится к сосредоточению устройств обработки информации (интеллектуальных) в центре. При этом необходимо большое число шин, а набор команд получается ограниченным, что приводит к дорогостоящим и неудобным для миогофункциональных систем решениям.

В отличие от этого в интерфейсе, построенном на основе идеологии элементной базы четвертого поколения, принято построение по параллельному принципу с противоположной тенденцией — пространственного распределения устройств обработки информации (интеллектуальных) по системе с приближением их к точкам съема и выдачи информации. Упомянутые устройства обработки информации должны обладать свойствами приспособления к изменениям окружающих условий. Таким свойством обладают процессоры с памятью и, в частности, микропроцессоры. Следовательно, рассматриваемый интерфейс предусматривает более широкое применение наборов микропроцессоров и микро-ЭВМ.

Перечисленным условиям удовлетворяет интерфейс, рекомендованный Международной электротехнической комиссией (МЭК). В интерфейсе предусмотрено 16 сигнальных линий. Каждая подсистема снабжена интерфейсом и может функционировать как источник информации, приемник информации, управляющее устройство (контроллер) или только контролировать сигналы в системе.

В режиме источника информация посылается на один или несколько приемников. В режиме приема информация принимается, а в режиме контроллера осуществляется управление потоком информации в магистрали и устанавливается, какие функциональные узлы и устройства должны передавать и какие принимать информацию. Наиболее простая система может состоять из одного источника и одного приемника. Магистраль состоит из 16 сигнальных линий, сгруппированных в три шины по функциональному признаку, и является полностью пассивной.

Информационная шина состоит из восьми сигнальных линий и используется для согласования работы источника, приемника, контроллера и для сигнала готовности к передаче и приему информации. Шина общего управления (пять сигнальных линий) использует только контроллер.

Для управления подключенными к магистрали устройствами контроллер использует команды, которые называются командами сопряжения и передаются двумя способами: однопроводные команды — по линиям шины управления (каждая такая команда соответствует сигналу на своей линии), многопроводные команды — по восьми информационным линиям в виде двоичных кодовых сигналов. Многопроводные команды, передаваемые по информационным линиям, называются первичными и вторичными. Первичные команды передаются за один такт или в первом такте двухтактной команды. Вторичные команды передаются во втором такте.

Команды разделяются функционально на три группы:

1) команды адреса, определяющие адрес источника и приемника;

2) адресованные команды, предписывающие выполнение определенных действий тому приемнику, адрес которого определен командой адреса. Эти команды индивидуально уточняются разработчиками системы;

3) универсальные команды, выдаваемые контроллером, предписывающие всем подсоединенным к магистрали устройствам выполнение определенных действий.

Для адресов в команде адреса предусмотрено пять двоичных разрядов, т. е. 31 адрес. Используя вторичную команду, число адресов можно увеличить до 961. Объем создаваемой системы ограничивается 15 устройствами, подключаемыми к магистрали с длиной кабеля до 15 м, однако она может быть увеличена путем применения расширительных блоков. Максимальная скорость передачи — до 1 млн. 8-разрядных чисел или двоичных кодовых сигналов в секунду (до 1 Мбайт/с).

Устройства легко компонуются в систему, если имеют выход на стандартный интерфейс. Они при этом могут непосредственно общаться между собой либо с процессором, передавая ему данные и получая от него инструкции. Работы по стыковке в этом случае сводятся к составлению программ управления без необходимости согласования уровня сигналов логики, обмена информацией и т. д. Следует отметить, что современные системы телемеханики обязательно имеют интерфейсную часть.

18.5. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ И ПРИОРИТЕТЫ

Интенсивность информационных потоков сообщений ТУ, ТС, ТИ и ПД в системах телемеханики продолжает

расти быстрыми темпами и в сложных многофункциональных системах может ограничиваться пропускной способностью канала связи. Это особенно опасно в аварийных ситуациях, когда потребность в системе телемеханики максимальна, а интенсивность информационных потоков возрастает в несколько раз и канал связи не будет пропускать возросший поток. Образно выражаясь, канал при этом может «захлебываться», что недопустимо.

Для исключения такой возможности и реального увеличения пропускной способности канала связи с учетом срочности и ценности информации вводятся приоритеты [9, 45].

При введении приоритетов должны учитываться не только срочность и возможность потерь информации, но и ее разнородный характер. Так, вся передаваемая информация разделяется по ее характеру на две группы:

1) детерминированная во времени специальными программами ПУ (например, циклическое ТИ текущих значений параметров при обработке информации на ПУ, ТИ интегральных значений, передаваемых с постоянным интервалом времени);

2) случайные сообщения ТС, ТУ и ТИ (если передаются значения ТИ при его изменении).

Детерминированные во времени передачи могут быть заранее упорядочены на ПУ так, чтобы одно сообщение следовало за другим и не перекрывалось во времени с другими, т. е. будут следовать без потерь. Значительно труднее упорядочить случайные сообщения и особенно передаваемые с КП, так как они могут возникать одновременно и создавать очереди при их передаче. Пропускную способность канала связи с учетом срочности сообщений можно резко увеличить путем выбора дисциплины приоритетов, которая устанавливает порядок в передаче сообщений.

Применяются следующие последовательности действий при возникновении заявки на передачу информации от источника с более высоким приоритетом:

прервать текущую передачу, а после окончания передачи с более высоким приоритетом возобновить ее с начала или с прерванного места. Такой приоритет называется абсолютным;

продолжать текущую передачу до конца, после чего начать передачу с более высоким приоритетом. Этот приоритет называется относительным;

продолжать текущую передачу до конца цикла или под-

цикла с запоминанием непереданной части сообщений. После окончания передачи с более высоким приоритетом передавать прерванное сообщение. Такой приоритет используется при передаче массивов заранее накопленных, например, сообщений ПД. Он содержит элементы абсолютного и относительного приоритетов и называется условно-абсолютным.

Высшим принят первый приоритет, следующим — второй и т. д. Первые приоритеты необходимо отдавать информации, задержка или отсутствие которой приводит к большим экономическим потерям с учетом среднего времени выполнения заявки от источника информации. Поэтому при равноценности информации по потерям более высокий абсолютный приоритет отдается информации, которая имеет меньшее суммарное время передачи.

Относительный приоритет предпочитается в тех случаях, когда задержка в передаче информации по более высокому приоритету на время окончания текущей передачи существенно не влияет на протекание производственного или другого управляемого или контролируемого процесса. Использование относительного приоритета позволяет сократить суммарное время передачи информации. Условно-абсолютный приоритет предпочитают при передаче сравнительно больших массивов, объем которых превышает объем информации с более высокими приоритетами.

Условно-абсолютный приоритет в известной мере сочетает в себе положительные качества абсолютного и относительного приоритетов. Он сокращает задержки в передаче информации с более высокими приоритетами и позволяет уменьшить время занятости канала связи, так как не требует повторных передач (в отличие от абсолютного приоритета).

В системах с рассредоточенными КП или при радиальной структуре каналов связи контролируемые пункты могут иметь различную значимость. Поэтому более высокие приоритеты могут устанавливаться в соответствии со значением КП в системе управления или с учетом последовательности возникновения заявок на обслуживание источника информации. В последнем случае необходима память для записи очередности заявок на передачу информации.

При учете значимости КП первые их номера принято отводить контролируемым пунктам, которые в большей степени определяют производственный или другой контролируемый процесс и вызывают наибольшие экономические

потери при задержке передаваемой информации. Представление приоритета КП с большей значимостью реализуется проще аппаратурно по сравнению с приоритетами в последовательности возникновения заявок на обслуживание.

В результате анализа реальных информационных потоков, например, в энергосистемах Советского Союза установлено, что средняя интенсивность требования на передачу двухпозиционной телесигнализации ТС на одно устройство составляет примерно 5000 в год, а характер этого потока в неаварийных условиях является в основном стационарным, т. е. не зависящим от начальной координаты времени [45]. Для технологического процесса информация о состоянии двухпозиционных объектов ТС является важнейшей. Она в наибольшей степени информирует оператора или ЭВМ о технологическом режиме работы как в нормальных, так и в аварийных ситуациях, при которых невозможны действия без информации ТС.

К одному из минимальных по интенсивности потоков относится поток информации телеуправления двухпозиционными объектами. Среднее число операций ТУ двухпозиционными объектами в энергосистемах на одно устройство в год составляет примерно 300 и в некоторых энергосистемах достигает 2000. В безаварийных ситуациях этот информационный поток также можно принять стационарным.

В соответствии с изложенным выше **первый (высший) приоритет** присваивается информации ТС.

Второй приоритет присваивается командам ТУ двухпозиционными объектами.

Как правило, устанавливают относительный приоритет сигналам ТС по сравнению с командами ТУ. Однако в ряде случаев, например в энергосистемах, запрещается исполнение команды ТУ, если за время посылки подготовительной команды ТУ изменилось состояние объектов ТС, т. е. устанавливается абсолютный приоритет для сокращения аварийных ситуаций. Оператор или ЭВМ при этом должны повторно послать команду ТУ.

Третий приоритет присваивается детерминированному потоку информации, порядок следования которого устанавливается ЭВМ или автоматическими устройствами. К такой информации относится телеизмерение интегральных значений параметров ТИИ (по вызову с ПУ), производственно-статистические данные ПД и многопозиционные кодовые команды телеуправления ТУ (КК). Эта информация передается по команде ПУ в неперекрывающие-

ся по времени интервалы [45], устанавливаемые, например, ЭВМ, поэтому относительное время передачи детерминированной информации (вероятность)

$$P_д = P_1 + P_2 + P_3, \qquad (18.1)$$

где $P_1 = \sum_{i=1}^{N} K_{1i}\tau/T_{1i}$ — относительное время или вероятность передачи ТИИ с i-го КП, причем K_{1i}—число ТИИ на i-м КП; N — число КП; T_{1i} — время интегрирования на i-м КП; τ — время передачи одного сообщения; $P_2 = \sum_{i=1}^{N} K_{2i}\tau/T_{2i}$ — относительное время или вероятность передачи ПД с i-го КП, причем K_{2i} — число ПД на i-м КП; T_{2i} — период опроса информации ПД на i-м КП; $P_3 = \sum_{i=1}^{N} K_{3i}\tau/T_{3i}$ — вероятность передачи многопозиционных кодовых команд на i-м КП, причем K_{3i} — число кодовых команд для i-го КП; T_{3i} — среднее время между посылками кодовых команд для i-го КП.

При одинаковом времени интегрирования ТИИ для всех КП — T_1 и одинаковом времени опроса всех КП при сборе ПД — T_2 получим:

$$P_д = \frac{\tau}{T_1}\sum_{i=1}^{N} K_{1i} + \frac{\tau}{T_2}\sum_{i=1}^{N} K_{2i} + \tau\sum_{i=1}^{N}\frac{K_{3i}}{T_{3i}}. \qquad (18.2)$$

Вероятность незанятого состояния системы передачей и приемом детерминированных потоков информации

$$q_д = 1 - P_д. \qquad (18.3)$$

Интенсивность детерминированных потоков информации и частота ее передачи возрастают с повышением уровня автоматизации процесса (производственного или другого) и достигают высокого значения при использовании ЭВМ. Интервал между передачами такой информации с одного КП уменьшается до 10 — 20 мин, однако во многих случаях информацию целесообразно передавать 1 раз в смену.

Информационный поток сообщений ТИ при циклической передаче или опросе КП имеет наибольшую избыточность, и в связи с этим телеизмерениям текущих значений

ТИТ для упомянутых условий присваивается **четвертый приоритет**. Информация ТИТ обычно передается в промежутки времени, когда канал связи не занят передачей информации более высоких приоритетов.

Передача информации ТС и двухпозиционных ТУ во многих случаях занимает канал связи значительно меньшее время, чем детерминированная информация. В качестве примера на рис. 18.4 приведена вероятность занятости аппаратуры пункта управления информацией ТС — P_{TC}, двухпозиционными ТУ — P_{TY} и детерминированной инфор-

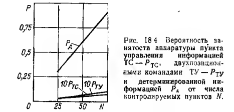


Рис. 18.4 Вероятность занятости аппаратуры пункта управления информацией ТС — P_{TC}, двухпозиционными командами ТУ — P_{TY} и детерминированной информацией $P_д$ от числа контролируемых пунктов N.

мацией $P_д$ в зависимости от числа контролируемых пунктов N при длительности обслуживания $\tau = 0,5$ с.

Более подробно информационные потоки и приоритеты рассмотрены в [45]. В результате анализа информационных потоков на моделях с учетом нормальных и аварийных ситуаций сделаны следующие выводы.

1. Анализ информационных потоков в аварийных ситуациях целесообразно проводить при аварии на одном КП, так как вероятность одновременной аварии на двух КП и более ничтожно мала. Средняя загрузка общей аппаратуры КП передачей информации ТС и ТУ крайне незначительна. Этой информации необходимо предоставлять высшие приоритеты и относительный приоритет — ТС по сравнению с ТУ.

2. Объемы детерминированной во времени информации при использовании ЭВМ для оперативного управления производством могут быть доминирующими и в основном будут определять загрузку всей системы. Это приводит к целесообразности повышения скорости передачи с учетом

повторных переспросов информации, искаженной помехами.

3. Для расчета средней загрузки аппаратуры ПУ передачей различной информации допустимо не учитывать аварийные ситуации.

4. При увеличении числа КП до 50 — 75 и резком увеличении интенсивности потоков потери информации по первым трем приоритетам отсутствуют и аварийная ситуация рассасывается сравнительно быстро после ее окончания. Это подтверждает возможность создания многофункциональных систем телемеханики с большим числом КП.

18.6. ПРИМЕНЕНИЕ МИКРО-ЭВМ И МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ТЕЛЕМЕХАНИКЕ

Подавляющее большинство устройств телемеханики третьего поколения типа ТМ (на интегральных микросхемах) работает совместно с ЭВМ (табл. 18.2). Применение ЭВМ резко расширило возможности устройств телемеханики и позволило, по существу, впервые более эффективно производить обработку информации программным путем [45]:

1) выполнять математические операции для получения обобщенных показателей, таких, как суммарная мощность, действительное значение расхода жидкой или газообразной среды, средние значения параметров со скользящим временем начала интегрирования, масштабирование при большом числе масштабных коэффициентов, усреднение, воспроизведение буквенно-цифровой и графической информации с помощью дисплеев, редактирование и компоновка информации для передачи ее на более высокий уровень иерархии или в ЭВМ высшего ранга и т. д.;

2) сравнивать контролируемые параметры с изменяющимися во времени уставками и(или) уставками, зависящими от значений других параметров;

3) выполнять более эффективно функции поиска неисправностей и диагностировать повреждения;

4) составлять по типовой форме статистическую плановую и другую отчетную информацию, а при необходимости более гибко обрабатывать и выдавать другую информацию.

Создание аппаратуры телемеханики четвертого поколения со встроенными микро-ЭВМ [34] явилось новым важным этапом в развитии телемеханики, значительно расширило ее возможности, улучшило технические показатели

Характеристика		Тип комп			
		ТМ-120-1	ТМ-120-2	ТМ-310	ТМ-320
Области применения		Центральное диспетчерское управление магистральными трубопроводами большой мощности	Районное диспетчерское управление магистральными трубопроводами	АСУ ТП промышленных предприятий горнодобывающей промышленности и энергетики	Диспетчеризация промышленных предприятий, электрических подстанций, коммунального хозяйства, ирригация
Число КП на один ПУ	Всего	До 30	До 32	До 99	До 99
	На одном направлении	До 8	До 16	1	До 8
Дальность действия, км		14 000	1000	20	20
Максимальные объемы информации с одного КП	ТС	256	16	120	56
	ТУ	160	8	120	48 на направление
	ТР	—	—	До 120 (за счет ТУ)	До 48 (за счет ТУ)
	КК	8	—	48	—
	ТИТ	224	8	225	1—постоянно до 96 по вызову
	ТИИ	8	—	120	—
	СК*	—	—	—	—
	ПД	512 десятичных разрядов	—	Не ограничено	—
Структура линий связи		Древовидная	Древовидная	Радиальная	Радиально-цепочечная

Таблица 18.2

лекса

ТМ-511, ТМ-512	ТМ 620	ТМ-321	УВТК-300	УВТК-501
АСДУ энергообъединений, диспетчеризация энергосистем	АСУ нефтепромысловых объединений	Диспетчеризация территориально рассредоточенных объектов жилищно-коммунального хозяйства и других объектов	Для обмена информацией между ПУ и КП и предварительной обработки ее микро-ЭВМ, осуществляющей также координацию работы блоков	Для обмена информацией между ПУ и КП и предварительной ее обработки микро-ЭВМ, осущесталяющей также координацию работы блоков. Предназначен для диспетчерского управления энергообъектами
1	До 120	От 4 до 24	—	—
1	До 8	—	—	—
14 000	60.	—	—	-
736, 480	8	До 40	120 (до 480)	512
—	8	До 4	120	120
—	—	—	—	—
—	—	—	46	8
80, 60	2	—	256 (до 512)	128 (до 256)
—	3	—	128 (до 256)	18
—	—	—	120	120
—	—	—	Ограничивается источниками и приемниками	Ограничивается источниками и приемиикоми
Радиальная	Радиально-цепочечная	Радиальная	Радиальная	Радиальная

Характеристика	Тип ком				
	ТМ-120-1	ТМ-120-2	ТМ 310	ТМ-320	
Тип канала связи	Некоммутируемый уплотненный	Некоммутируемый уплотненный	Физическая пара	Физическая пара	
Режим передачи по каналу связи	Полудуплекс	Полудуплекс	Полудуплекс	Полудуплекс	
Скорость передачи по каналу связи, бит/с	50; 75; 100; 200; 300; 600	600	300; 600	300	
Категория достоверности передачи информации	1	2	1	1	
Погрешность ТИТ цифрового (аналогового) воспроизведения, %	0,6(1)	0,6(1)	0,6(1)	1	
Работа с ЭВМ	Да	Да	Да	—	
Температурный диапазон, °С: КП ПУ	 +5÷+30 +5÷+50	 −30÷+50 +5÷+50	 −30÷+50 +5÷+50	 −30÷+50 +5÷+50	
Габариты, мм: КП ПУ	 — —	 — —	 — —	 — —	
Габариты выходных реле, мм	—	—	—	—	

* Служебные команды (СК).

по эффективности, достоверности и достижимой максимальной информационной емкости контролируемого или управляемого производственного или другого процесса.

С переходом к четвертому поколению технических средств телемеханики разработаны следующие новые виды телемеханических комплексов со встроенными микроЭВМ серии АСТТ-2:

плекса

ТМ-511, ТМ 512	ТМ-620	ТМ-321	УВТК-300	УВТК-501
Некоммутируемый уплотненный	Физическая пара	Выделенный	Типовой телефонный, высокочастотный и др	Типовой телефонный, в том числе по высоковольтным линиям электропередачи
Дуплекс и симплекс	Полудуплекс	—	Дуплекс	—
37,5; 50; 100; 200; 300; 600, 25; 37,5, 50; 100, 200; 300, 600	—	—	—	—
1	—	—	—	—
0,6(1)	—	—	—	—
Да	Да	Да	Да	Да
$+6 \div +50$ $+5 \div +50$	— —	— —	— —	— —
— —	— —	300×260×300 2000×800×450	2000×800×450 2000×800×450	2000×800×450 2000×800×450
—	—	—	600×800×450	600×800×450

управляющие вычислительные телекомплексы типа УВТК для промышленных предприятий, энергосистем и трубопроводного транспорта;

устройства обработки телемеханической информации УОТИ;

комплекс средств концентрации буквенно-цифровой информации в АСУ (УВТК — КИ), являющихся разновидностью концентраторов в сетях с ЭВМ (см. § 19.4).

Применение в этих комплексах микро-ЭВМ типа «Электроника 60» с достаточно высоким быстродействием (200 тыс. операций в секунду), значительным объемом памяти (до 28 Кслов), с 16-разрядными словами и развитым математическим обеспечением позволило получить высокоэффективные управляющие комплексы для территориально разнесенных объектов с информационными процессами, осуществляемыми программным путем. Программирование можно вести на языках разных уровней.

Архитектура и система команд микро-ЭВМ «Электроника 60» совпадают с архитектурой и системой команд широко применяемых мини-ЭВМ. Это обеспечивает преемственность математического обеспечения. Вместе с микро-ЭВМ поставляются операционная система с транслятором с языка АССЕМБЛЕР, программа отладки, интерпретатор с языка высокого уровня БЕЙСИК и пакет стандартных подпрограмм. Ожидаются поставки трансляторов с языков ФОРТРАН и других языков высокого уровня. Отметим, что переход к программируемым средствам телемеханики, содержащим встроенные микропроцессорные наборы или микро-ЭВМ, характерен для современного этапа развития мировой техники.

Разработки УВТК отличаются от лучших образцов мировой техники более эффективными способами сжатия передаваемых сообщений. Это позволило лучше использовать дорогостоящие каналы связи и меньше загружать ЭВМ. Вместо циклического метода в УВТК полностью перешли к спорадическим методам передачи всех видов (и, главным образом, новой) информации, включая телеизмерения. Одной из отличительных характеристик является наличие связей не только между ПУ и КП, но и между различными контролируемыми пунктами, т. е. возможность реализации не только централизованных, но и децентрализованных или комбинированных структур. В результате расширяются возможности создания высокоэффективных сетей телемеханики, которые могут решать совместно с различными ЭВМ более сложные задачи, рассматривая сеть как более крупную ЭВМ в целом, т. е. как многомашинный комплекс (см. § 19.5).

В связи с переходом от устройств телемеханики третьего поколения к устройствам четвертого поколения улучшились характеристики комплексов по точности в 1,5—2 раза, по быстродействию в 2—3 раза, по надежности в 4—5 раз. Это позволило снизить трудоемкость изготовления в

2—3 раза; уменьшилась трудоемкость процессов проектирования и последующей реализации систем автоматизации производственных и других процессов. Относительная трудоемкость более резко уменьшается с укрупнением и усложнением автоматизируемых комплексов. Необходимые ранее запасы оборудования и аппаратуры для управления, учитывающие возможности расширения объектов, теперь могут быть сокращены. В аппаратуре четвертого поколения есть возможность не только наращивания функций и информационных емкостей, но и замены одних функций другими. Для этого достаточно заменить или добавить функциональные блоки и программные модули, т. е. резко возрастает гибкость системы.

Рассмотрим некоторые особенности комплексов телемеханики четвертого поколения (см. табл. 18.2). Для управляющих вычислительных телекомплексов (УВТК) характерны следующие новые свойства и показатели:

в результате сжатия передаваемых сообщений с переходом на спорадические передачи значительно расширилось число объектов ТУ, ТС, ТИ, ПД, КК и служебных сигналов в системе. Так, к одному КП может быть подключено до 16 дисплеев, удаленных на расстояние до 3 км;

появилась возможность непосредственного обмена информацией между КП с автоматической маршрутизацией сообщений по многосвязным разветвленным каналам связи;

повысились быстродействие и оперативность отображения информации путем использования постоянно обновляемого банка данных по мере изменения параметров ТС и ТИ;

измеряемые параметры масштабируются, сравниваются с уставками, определяется время простоя оборудования, периодически и при возникновении новой информации спорадически регистрируются измеряемые параметры и состояния;

на цветных дисплеях отображается информация в буквенно-цифровом и графическом виде (в таблицах и изображениях мнемосхем совместно с контролируемыми параметрами). При этом неизменная (статическая) часть информации таблиц и мнемосхем сохраняется на гибком диске или в кассетах магнитофона. В результате этого отпадает необходимость в специальной мини-ЭВМ для обработки и отображения информации, как это было необходимо ранее в комплексах АСТТ-1;

все логические функции, включая самые сложные, реализуются программными способами вместо аппаратурных. Это привело к резкому упрощению функциональных блоков и полному исключению блоков режима работы (БРР), индивидуальных для каждого устройства телемеханики и занимающих значительный удельный вес в аппаратуре третьего поколения (см. § 18.3);

если в устройствах телемеханики третьего поколения унификация проводилась последовательно, включая корпуса интегральных микросхем, а функциональные блоки по существу были не унифицированными, то в устройствах четвертого поколения унификация и агрегатизация проведены последовательно, включая функциональные блоки.

Устройства УВТК строятся из единого набора следующих функциональных блоков:

сбора и воспроизведения дискретных сигналов;

аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования;

интегрирования;

выдачи и исполнения двухпозиционных и кодовых команд;

преобразования кодов;

модемов;

контроля работы устройств;

синхронизации;

линейных узлов;

генераторов тактовой частоты;

источников питания;

интерфейсных карт для стыковки с дисплеями, регистраторами производства, мозаичной печатью, кассетными магнитофонами и т. д.

Специфика каждого комплекса незначительно влияет на построение функциональных блоков и узлов. Наибольшие изменения вносятся каналами связи, для которых необходимо иметь несколько модификаций блоков. Другие модификации функциональных блоков для различных комплексов УВТК, по существу, сведены к модификациям программных модулей.

В УВТК используется интерфейс программно-аппаратных комплексов (ИПАК), позволяющий подключать все функциональные блоки к шинам интерфейса, которые через интерфейсную карту соединяются с микро-ЭВМ. Применение ИПАК существенно снижает затраты времени на

установление связи между микро-ЭВМ и инициативными функциональными блоками, что является отличительной особенностью этого интерфейса. Интерфейс программно-аппаратных комплексов устанавливает алгоритм, номенклатуру, электрические параметры и конструктивную реализацию обмена информацией между микро-ЭВМ и функциональными блоками.

Устройство обработки телемеханической информации (УОТИ) со встроенным набором микро-ЭВМ может функционировать совместно как с КП, так и с ПУ. Например, при работе совместно с КП УОТИ может выполнять различные локальные функции, такие, как функции машин централизованного контроля.

Устройство обработки телемеханической информации выполняет следующие виды обработки информации:

линеаризацию, необходимую для коррекции нелинейности характеристик первичных преобразователей;

масштабирование для преобразования значений параметров из относительных в абсолютные, необходимые для воспроизведения и регистрации;

интегрирование значений параметров в течение длительных промежутков времени (например, за смену, сутки);

сравнение с уставками для регистрации и (или) сигнализации выхода значений параметров за пределы зоны допустимых значений;

учет времени простоя или работы технологического оборудования;

статистическое сглаживание и сжатие данных.

Вся информация, поступающая в УОТИ, укладывается в массивы: ТИТ и ТС — байтовые; ТИИ — двухбайтовые. Массивы организованы по номеру КП, функциональному адресу и номеру группы. Каждый параметр ТИТ имеет 1 байт маркеров, 2 байта уставок, 2 байта типов масштабных коэффициентов и 3 байта технологического адреса.

Комплекс технических средств концентрации буквенно-цифровой информации (концентратор) типа УВТК — КИ предназначается для построения в АСУ подсистем сбора, предварительной обработки, передачи и распределения данных. Он позволяет осуществить дистанционный доступ через каналы связи большого числа пользователей к ЭВМ, обрабатывающей информацию. Комплекс состоит из абонентской станции и устройства сопряжения ЭВМ с кана-

лами связи, называемого мультиплексором. Он освобождает ЭВМ, обрабатывающую информацию, от функции управления терминалами, от унификации форматов первичных кодов, циркулирующих в сети. В результате статистического сжатия данных сокращаются расходы на аренду каналов связи или интенсивность потоков информации примерно на 30 %. Как отмечалось ранее, УВТК — КИ позволяет строить сети телемеханики с ЭВМ с централизованной, децентрализованной и комбинированной структурами и маршрутизацией передаваемой информации.

Следует отметить, что объем технических средств микро-ЭВМ (число плат ее микросхем) в УВТК занимает менее 25 % общего объема технических средств комплекса без учета оконечной аппаратуры.

В заключение параграфа перечислим некоторые общие принципы построения информационных систем с обменом информации в реальном масштабе времени между ЭВМ и периферийными устройствами.

В телемеханических системах при большом числе первичных преобразователей ТИ и ТС необходимо принимать меры против «старения» информации от быстропротекающих процессов путем введения приоритетов, передачи только новой информации и т. п. Одним из эффективных путей уменьшения «старения» информации от быстропротекающих процессов при возрастании информационной емкости является переход на следующие два режима работы системы обмена информацией:

программно-определенный между ЭВМ и КП (терминалами), устанавливаемый по инициативе ЭВМ;

программно-независимый, возникающий по инициативе одного из первичных преобразователей ТИ, ТС, приемников или пользователей информации.

В связи с этим система обмена информацией должна предусматривать не только совокупность аппаратурных, но и программных средств для изменения программы работы ЭВМ по запросу КП (терминала).

Для повышения эффективности системы обмена информацией между ЭВМ и КП (терминалами) к ней необходимо предъявлять следующие требования:

1) максимальное использование производительности ЭВМ при работе в реальном масштабе времени;

2) возможность изменения информационной емкости и числа КП (терминалов) без коренной переработки системы обмена информацией и логики ее обслуживания;

3) минимальное число ячеек в запоминающем устройстве ЭВМ, используемых для связи ЭВМ с КП (терминалом). С этой целью в сетях с ЭВМ применяют различные типы связных процессоров (гл. 19);

4) эффективный контроль работы системы обмена информацией, имеющий целью высокий уровень функционирования;

5) достаточный уровень взаимной синхронизации работы системы обмена и ЭВМ. Для этого необходимо предусмотреть синхронизирующие сигналы, обеспечивающие эффективную последовательность операций обмена информацией;

6) высокий уровень унификации методов подключения КП (терминалов) и ЭВМ (единообразие кодов, методов связи КП и ЭВМ, интерфейсов). При проектировании телеинформационной системы или комплекса всегда могут быть подобраны типовые ЭВМ или наборы микропроцессоров, работающие на различных уровнях иерархии комплекса, построены или абонированы типовые каналы связи, выбраны первичные преобразователи ТИ, ТС и исполнительные органы. Аналогично во многих случаях могут быть подобраны типовые системы телемеханики (ТУ, ТС, ТИ, ПД).

Однако система обмена информацией в комплексе, как правило, имеет индивидуальный характер из-за различного многообразия для комплекса первичных преобразователей, числа КП, входов, выходов и требований к системе.

Следовательно, главным направлением при проектировании разнообразных информационных комплексов для уменьшения индивидуального характера системы обмена информацией должен быть высокий уровень унификации сигналов и методов подключения и функционирования всех КП (терминалов) и ЭВМ.

В заключение рассмотрим особенности централизованной и децентрализованной структур системы обмена информацией [34].

К достоинствам централизованной структуры относятся:

единая схема синхронизации системы в режиме обмена информацией;

наличие группового дешифратора кодов адресов, что уменьшает объем оборудования при большом числе первичных преобразователей;

наличие группового шифратора кодов прерывания при асинхронном режиме обмена информацией, что упрощает аппаратуру и уменьшает число соединительных проводов с ЭВМ;

возможность простого изменения принятого порядка присвоения приоритета путем изменения порядка подключения КП (терминалов) к входу блока обмена;

возможность выбора импульсов значительной длительности при обмене информацией с абонентами в блоке обмена, что упрощает требования к выполнению монтажа в блоке обмена и повышает помехоустойчивость системы обмена.

К недостаткам централизованной структуры относятся:

необходимость изменения схемы блока обмена при увеличении числа КП (терминалов);

большая аппаратурная избыточность схем шифратора кода и дешифратора адреса при малом числе КП (терминалов);

сложность автоматизации контроля блока обмена информацией из-за большого числа входных и выходных цепей.

К достоинствам децентрализованной структуры относятся:

легкость наращивания числа абонентов в системе обмена;

простота изменения порядка присвоения приоритета;

простота проведения автоматического контроля работы системы обмена информацией с ЭВМ;

простота реализации системы обмена информацией при малом числе КП (терминалов).

К основным недостаткам децентрализованной структуры относятся:

увеличение объема аппаратуры при реализации для КП схем синхронизации, шифраторов кодов прерывания и схем совпадения для дешифрирования адресов при синхронном обмене;

технические трудности, связанные с обеспечением требуемых характеристик каналов сопряжения с ЭВМ при большом числе КП (терминалов).

Из изложенного выше видно, что при большом числе КП (терминалов) преимущество имеет централизованная структура системы обмена информацией, а при малом — децентрализованная.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ С ЭВМ

19.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Одной из основных и характерных особенностей развития информационных систем на верхних рангах иерархии является их преобразование в информационные сети с ЭВМ. Возникновение сетей, состоящих из средств вычислительной техники и средств связи, характерно для современных этапов развития как вычислительной техники, так и техники связи [8, 18]. В последние годы создаются также сети телемеханики (см. § 19.5).

В СССР и технически развитых государствах эксплуатируются десятки информационных сетей с ЭВМ с относительно высоким уровнем их организации. Поэтому для современного развития сетей, начало которому положено в 1960 — 1963 гг., уже характерен сравнительно высокий уровень их развития. Сначала создавались и совершенствовались автономные вычислительные центры, затем с помощью средств связи вычислительные центры стали объединяться в более сложные и технически совершенные комплексы — информационные сети.

При изучении информационных сетей полезно провести их аналогию с энергетическими сетями и энергосистемами, которые начали создаваться на полвека раньше. В электрических энергосистемах вырабатывается и распределяется электроэнергия: происходят процессы преобразования, передачи, распределения и потребления энергии. Создание энергосетей улучшает экономические показатели за счет перехода ко все более мощным электростанциям и открывает возможности перетока энергии в сети с целью сглаживания пиковых нагрузок отдельных потребителей. Последнее свойство позволяет рассчитывать мощность сети на сумму не пиковых нагрузок, а средних нагрузок сети. Заметим, что только это новое качество сети экономически оправдывает затраты на ее создание. Одновременно с переходом к энергосети значительно улучшаются качественные показатели электроэнергии, такие, как бесперебойность, постоянство напряжения и частоты.

Аналогично энергосетям в информационных сетях автоматически протекают информационные процессы первичного отбора, сбора, передачи, обработки, распределения, поиска и отображения информации. Создание информацион-

иых, так же как и энергетических, сетей позволяет улучшить экономические показатели обработки информации путем перехода к более экономичным, высокопроизводительным ЭВМ за счет более равномерной их загрузки и открывающихся возможностей выравнивания пиковых нагрузок территориально разнесенных вычислительных центров. Например, задача для ЭВМ, поданная днем в вычислительный центр в Сан-Франциско (во время его пиковой нагрузки), может быть автоматически перенесена в вычислительный центр (ВЦ) в Лондоне, где в это время ночь и меньше загрузка ВЦ. Передача данных между Лондоном и Сан-Франциско происходит автоматически через спутниковую связь, и автор задачи не знает, где она решается.

По сравнению с энергосетями информационные процессы в информационных сетях несравненно сложнее, динамичнее и многообразнее. Так, в энергосетях вырабатывается унифицированный вид электроэнергии — переменный ток с частотой 50 Гц, при этом электростанции работают синхронно и синфазно и электроэнергия имеет безадресный характер. В отличие от этого в информационных сетях оказалось целесообразным создавать на различных вычислительных центрах проблемно-ориентированные банки данных, программ и алгоритмов. Поэтому информация в отличие от электроэнергии не имеет безликого характера, что существенно усложняет все информационные процессы.

Бо́льшая часть потоков информации в технически развитых государствах в настоящее время обрабатывается в информационных сетях, капиталовложения в которые становятся соизмеримыми с капиталовложениями в энергосистемы и сети, хотя они меньше по абсолютному значению. При этом «информационный взрыв» можно пояснить на следующем примере. В США количество данных, собираемых и обрабатываемых государственными учреждениями, возросло за последние 40 лет более чем в 100 раз, т. е. возрастало примерно в 3,3 раза за каждое десятилетие, в то время как население за 40 лет увеличилось всего в 2 раза. Еще быстрее возрастает потребность в обработке информации для управления производством, в сфере обслуживания, на транспорте, в сельском хозяйстве. Все это показывает настоятельную необходимость перехода к высокопроизводительным формам обработки информации на ЭВМ и в информационных сетях с ЭВМ.

Информация в жизни современного человека приобре-

тает очень большое и всевозрастающее значение. Материальные затраты человека на информацию становятся соизмеримыми с затратами на питание и продолжают возрастать (книги, газеты, кино, театр, радио, телевидение и т. п.). При этом человечество уже накопило громадный объем знаний в различных сферах деятельности, и для отыскания необходимых справок и сведений человек вынужден тратить много времени, чтобы найти их в книгах или других хранилищах информации. Затрачиваемое на это время продолжает угрожающе возрастать. Кроме того, отыскиваемая информация обычно нуждается в обработке.

На современном этапе научно-технической революции информационные сети освобождают человека от утомительных, рутинных операций поиска нужной информации, ее обработки и передачи.

Наиболее быстродействующие, высокоэффективные и совершенные формы существования машинной информации в процессах передачи, хранения, обработки, отображения и поиска развиваются в автоматически действующих системах, ЭВМ и сетях с ЭВМ. При проведении сложных научных экспериментов, управлении производственными комплексами, банками, фирмами, планировании и управлении в государстве и т. п. возникает необходимость в выполнении больших объемов информационно-вычислительных работ, при этом источники информации и ее потребители могут быть удалены на большие расстояния.

Для решения этих задач и создаются информационные сети с ЭВМ. При создании сетей появляется возможность выполнять более эффективно многие функции, ранее выполняемые в локальных информационных системах, такие, как поиск необходимой информации и выдача справок, обработка по сложным алгоритмам, диагностика повреждений, более эффективные методы обучения и т. д.

К решающим факторам перехода к сетям относится экономический — удельная стоимость обработки информации значительно уменьшается с увеличением количества информации и обработкой ее в сетях. В таких сетях наблюдается все большее сосредоточение крупных хранилищ информации и объемов хранимой информации, а также наибольшее ее разнообразие по назначению. Возрастают также потоки обмена обработанной информацией.

В обозримом будущем эти тенденции, по-видимому, сохранятся, т. е. в банках информационных сетей будут сосредоточиваться грандиозные объемы разнообразной

информации. Информация, собираемая в сетях, будет использоваться для научных исследований, контроля, измерения, управления, функционирования, справок, учета, планирования, стандартизации, обучения и т. п. Таким образом, информационные сети становятся конкурентами книг, журналов и других письменных и печатных текстов. По ряду показателей сети их превосходят.

19.2. ФУНКЦИИ СЕТЕЙ

Прежде чем перейти к изложению важнейших функций сетей, рассмотрим следующие четыре этапа их развития.

Первый этап. С возрастанием потребностей в машинной обработке информации на ЭВМ возникают новые и развиваются уже созданные вычислительные центры. Однако из-за систематической неравномерности потоков обрабатываемой информации во времени и естественных запасов в мощности вычислительных центров средняя загрузка ВЦ часто не превышает 50 %. Возникает потребность в более равномерной и полной загрузке ЭВМ во времени. Один из таких эффективных и простейших путей — это режим работы ЭВМ с **разделением во времени.**

У абонента ЭВМ, которого в дальнейшем будем называть пользователем, среднее время выполнения задачи на ЭВМ обычно во много раз меньше средней паузы между задачами или этапами задач. Поэтому к каждой ЭВМ целесообразно подключать ряд пользователей и коммутатором автоматически их переключать. Естественно, что для каждого пользователя необходимо запоминать задание и еще не выданные решения задач. Такой режим работы ЭВМ и называется режимом разделения во времени.

На первом этапе развития сетей проводятся научно-исследовательские разработки системы выполнения операций, ориентированных на обработку информации на расстоянии (телеобработка) и режима работы ЭВМ с разделением во времени, создается база для функционирования сети вычислительных центров.

В процессе эксплуатации систем с разделением времени, естественно, возникает специализация отдельных ВЦ на решение задач определенного профиля, благодаря накоплению на ВЦ массивов информации с программами и справочными материалами, полученными ранее при решении других задач.

Такие массивы информации, называемые соответственно проблемно-ориентированными банками алгоритмов, программ и банками данных, значительно снижают время между постановкой задачи и решением ее на ЭВМ и расширяют сферу услуг ВЦ. Возникает необходимость во взаимодействии пользователей со специализированными ВЦ,

удаленными на большие расстояния. Из экономических соображений целесообразным становится создание для рядв ВЦ единой сети связи, объединяющей эти ВЦ и всех пользователей.

На втором этапе разрабатываются методы организации взаимодействия между ВЦ и удаленной аппаратурой пользователей, которая называется *терминалами* (рис. 19.1). Рассматриваются вопросы проектирования и оптимизации структуры вычислительных сетей сначала, главным образом, централизованной структуры.

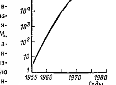


Рис. 19.1. Рост числа терминалов в мире.

Для третьего этапа характерно расширение и усложнение сети передачи данных. Здесь уже целесообразно применение специализированных ЭВМ для управления каналами при взаимодействии различных ВЦ сети. Такие ЭВМ представляют собой специализированные мини-ЭВМ, разгружающие большие вычислительные машины от решения задач по передаче данных. Мини-ЭВМ, называемые также связными процессорами, выполняют буферизую обработку сообщений, концентрацию данных, коммутацию сообщений, маршрутизацию и т. д.

Основная масса связных процессоров, применяемых в настоящее время в сети, относится к программируемым машинам, осуществляющим эффективную стыковку с различными устройствами передачи данных и терминалами. Связные процессоры имеют систему ввода-вывода в режиме работы с реальным масштабом времени, специализированную для передачи данных систему команд, ориентированную на обработку данных, имеют алгоритмы диагностики и исправления ошибок и средства для статистики ошибок (трафика — закономерности потока информации).

Для четвертого этапа развития сетей характерна такая организация управления сетью, которая дает возможность пользователям взаимодействовать с сетью ВЦ как с единой вычислительной машиной. На этом этапе в основном уже решены задачи связи и разработаны алгоритмы «примитивного» взаимодействия ВЦ сети и передачи данных. В последнее время усилия разработчиков направлены на решение проблемы управления сетью в целом.

Для современных сетей характерно широкое применение также специализированных ЭВМ, таких, как терминальные процессоры-концентраторы, осуществляющие соединение пользователей сетью для более эффективного ее использования. При этом если в современных энергосистемах применяют главным образом крупные

электростанции, то в информационных сетях используются не только высокопроизводительные ЭВМ для обработки информации, но и специализированные связные и терминальные процессоры (мини- или микро-ЭВМ).

Для информационных сетей характерно значительное разнообразие видов обслуживания абонентов. Перечислим виды обслуживания, которые чаще всего сети предлагают своим абонентам (пользователям):

предоставление абонентам вычислительных мощностей и программ общего математического обеспечения. Абонент при этом сам программирует задачу и вводит ее вместе с исходными данными в любой ВЦ сети. Такое коллективное использование высокопроизводительных вычислительных систем взаимно выгодно как абонентам, так и владельцам ЭВМ;

предоставление абонентам сетей связи для передачи их данных, которые позволяют абонентам передавать массивы данных с ВЦ на ВЦ. Это основной вид обслуживания в сетях передачи данных. Он должен приниматься во внимание, так как «чистая» передача данных может сильно перегрузить сеть связи и при этом у ВЦ возникнут простои;

предоставление проблемно-ориентированных фондов алгоритмов, программ и части информации. Если абоненту необходимо решить задачу, то он может не программировать ее, а вызвать соответствующую программу из фондов алгоритмов и программ. Предоставление проблемно-ориентированных фондов алгоритмов и программ ускоряет во много раз решение вычислительных задач;

информационные фонды, накопленные в сетях, дают возможность абонентам оперативно получать и обрабатывать необходимые данные. Заметим, что оперативное предоставление проблемно-ориентированных фондов алгоритмов, программ и массивов информации возможно только в информационных сетях;

супервычислительные работы — это работы, которые принципиально не могут быть решены на одном вычислительном центре. К ним относится автоматический поиск информации в рассредоточенных по сети массивах данных, размещенных на различных ВЦ, или совместное решение крупной задачи несколькими ВЦ;

работы специального назначения, обычно выполняемые в специализированных сетях, например резервирование билетов или мест в гостиницах, решение биржевых задач и т. д.

Перечисленные виды обслуживания могут предоставляться абонентам в различных режимах функционирования сети, таких, как местная и удаленная пакетная обработка, диалог абонента с ЭВМ, автоматическое взаимодействие ВЦ — ВЦ.

Местная пакетная обработка информации производится непосредственно на ВЦ и используется для догрузки ЭВМ, а также для служебных целей. Удаленная пакетная обработка, называемая также па-

кетной телеобработкой, позволяет пользователю вводить программы и массивы со своего удаленного терминала так же, как и в случае местной пакетной обработки (в программу добавляются макрокоманды телеобработки), и вводить задания на выполнение программы, которая хранится во внешней памяти ЭВМ. После этого пользователь получает результаты выполнения своих программ. Такой режим работы называется режимом з а п р о с - о т в е т.

Если ЭВМ сети использует режим разделения времени или быстрой пакетной обработки, то а сети можно осуществлять д и а л о г п о л ь з о в а т е л я с Э В М. Это дает возможность оперативно отлаживать программы и быстро получать ответы на короткие задачи. Абонент при этом отвлекает на себя значительную часть мощности ВЦ по сравнению с другими режимами, следовательно, этот режим работы более дорогой. Режим диалога широко используется при информационно-справочном обслуживании пользователей. Он предъявляет повышенные требования к быстродействию каналов связи и связных процессоров.

При выполнении супервычислительных работ, а также при пакетной телеобработке и диалоге с автоматическим распределением нагрузки между ВЦ сети осуществляется автоматическое взаимодействие ВЦ — ВЦ. Пользователь при этом работает с сетью как с единой супер-ЭВМ. В ряде сетей этот режим получает все более широкое развитие.

19.3. ПРИМЕРЫ СЕТЕЙ

Одна из важнейших целей создания информационных сетей — повышение эффективности информационного и вычислительного обслуживания абонентов. На примере четырех крупнейших сетей США — АРПАНЕТ, САЙБЕРНЕТ, ОКТОПУС и ДЖЕ — рассмотрим, как реализуется обслуживание абонентов[1]. Справочные сведения о трех сетях приведены в табл. 19.1.

Сеть АРПАНЕТ[1] — крупнейшая в Америке. Ее разработка началась в 1967 г. по инициативе Управления перспективного планирования научно-исследовательских работ Министерства обороны США. Эта сеть объединила вычислительные центры таких крупных научно-исследовательских организаций, как «РЭНД Корпорейшн», «Систем Корпо-

---

[1] АРПАНЕТ — сокращенное от Advanced Research Project Agency—ARPA Управления перспективного планирования научно-исследовательских работ Министерства обороны США; САЙБЕРНЕТ — англизированное слово «кибернетика»; ОКТОПУС — в переводе с английского «осьминог». Окончание НЕТ — в переводе с английского «сеть».

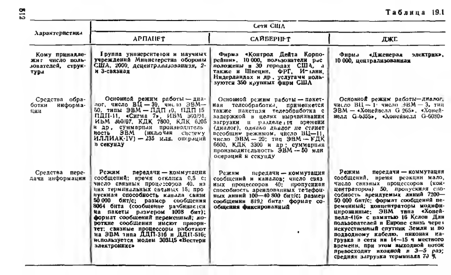


Таблица 19.1

Характеристика	Сети США		
	АРПАНЕТ	САЙБЕРНЕТ	ДЖЕ
Кому принадлежит число пользователей, структура	Группа университетов и научных учреждений Министерства обороны США, 2000, *децентрализованная*, 2- и 3-связная	Фирма «Контрол Дейта Корпорейшн», 10 000, пользователи расположены в 30 городах США, а также в Швеции, ФРГ, Италии, Нидерландах и др., услугами пользуются 350 крупных фирм США	Фирма «Дженерая электрик», 10 000, централизованная
Средства обработки информации	Основной режим работы — диалог, число ВЦ — 39, число ЭВМ — 50, типы ЭВМ — ПДП 10, ПДП 15 ПДП-11, «Сигма 7», ИБМ 360/91, ИБМ 360/67, КДК 7600, КДК 6205 и др., суммарная производительность ЭВМ (включая систему ИЛЛИАК-IV) — 235 млн. операций в секунду	Основной режим работы — пакетная телеобработка, применяется также пакетная телеобработка с задержкой в целях выравнивания загрузки и разделения времени (диалог), однако *диалог не станет* всеобщим режимом, число ВЦ — 11, число ЭВМ — 20; тип ЭВМ — КДК 6600, КДК 3300 и др.; суммарная производительность ЭВМ — 50 млн операций в секунду	Основной режим работы — *диалог*, число ВЦ — 1, число ЭВМ — 3, тип ЭВМ — «Хонейвелл G 265», «Хонейвелл G-6355», «Хонейвелл G-6080»
Средства передачи информации	Режим передачи — коммутация сообщений; время отклика 0,5 с; число связных процессоров 40, из них терминальных связных 15; пропускная способность канала связи 50 000 бит/с; размер сообщения 8064 бита (сообщение разбивается на пакеты размером 1008 бит); формат сообщений *переменный*; *короткие* сообщения имеют приоритет; связные процессоры работают на ЭВМ типа ДДП-316 и ДДП-516; используется модем 303Ц5 «Вестерн электроникс»	Режим передачи — коммутация сообщений и каналов; число связных процессоров 40; пропускная способность арендованных телефонных линий 100—40 800 бит/с; размер сообщения 8192 бита; формат сообщения фиксированный	Режим передачи — коммутаця сообщений, время реакции мало, число связных процессоров (*концентраторов*) *50*. *пропускная* способность арендуемых линий 7200—50 000 бит/с; формат сообщений переменный; концентраторы модифицированные; ЭВМ типа «Хонейвелл-416» с памятью 16 Кслов. Для пользователей в Европе связь через искусственный спутник Земли и по подводному кабелю, пиконая нагрузка в сети ни 14—15 ч местного времени, при этом выходной поток превосходит *входной в 3—5 раз*; средняя загрузка терминала 70 %

рейшн», Гарвардский университет, Стэнфордский исследовательский институт и ряд учреждений и организаций Министерства обороны США. Глобальный характер сети подтверждается тем, что в настоящее время АРПАНЕТ имеет пользователей, например, в Норвегии и на Гавайских островах.

Независимо от географического положения абонентов АРПАНЕТ дает возможность получать доступ к данным, хранящимся в любом вычислительном центре сети, использовать в режиме диалога программы, находящиеся в любом ВЦ сети, решать большие задачи на мощных вычислительных машинах, осуществлять автоматический поиск информации в рассредоточенных по сети массивах данных, передавать информационные массивы по каналам связи.

Технически это осуществляется с помощью высокопроизводительной системы передачи данных (среднее время передачи данных 0,5 с), системы протоколов — наборов соглашений о формах и порядке следования данных во времени обмениваемых сообщений, системы преобразования данных, переводящей коды одной ЭВМ в коды другой программно-несовместимой ЭВМ.

Для повышения эффективности прогнозов погоды было решено наиболее трудоемкие вычислительные операции передавать на суперсистему ИЛЛИАК-IV включенную в сеть АРПАНЕТ.

Применение ИЛЛИАК-IV позволяет моделировать один день за 1—2 мин работы центрального процессора, в следовательно, и эффективно моделировать годичные прогнозы погоды. При этом запоминающая лазерная память типа Unicon ИЛЛИАК-IV позволяет хранить $0,6 \cdot 10^{12}$ бит информации при одновременной работе с центральным процессором, устраняя тем самым все задержки, связанные с работой системы хранения информация.

Сеть САЙБЕРНЕТ объединила вычислительные центры фирмы «Контрол Дейта Корпорейшн». Это первая в мире сеть, доступная большому числу пользователей. Процесс организации САЙБЕРНЕТ начался в 1963 г. Первый этап заключался в связывании путем несложных устройств отдельных ЭВМ и введении доступа многих абонентов к ВЦ по одной линии связи. В 1965 г. была сделана первая петля (многосвязанность сети) и открылись возможности для взаимодействия всех ВЦ сети. В 1967 г. в сети появился режим диалога, однако по замыслу разработчиков диалог не будет основным режимом.

Абоненты сети могут:

арендовать машинное время, при этом виде обслуживания абонент пользуется техническими ресурсами ЭВМ и ресурсами математического обеспечения, включая сервисные программы;

производить вычислительные работы с использованием проблемно-ориентированных фондов алгоритмов и программ. Абонент в таких случаях обращается в сеть через устройство ввода-вывода не непо-

средственно, а через оператора сети, который решает задачу, используя накопленный в САЙБЕРНЕТ фонд алгоритмов и программ. Абонент сети может и не иметь достаточных знаний для работы с ЭВМ непосредственно;

использовать проблемно-ориентированные массивы данных. Сеть САЙБЕРНЕТ выдает данные по запросам абонентов. Массивы данных накапливаются и выдаются по единым методикам, разработанным абонентами. Сеть отвечает при этом только за хранение массивов, но не за их содержание.

Сеть ОКТОПУС разработана в Калифорнийском университете. Она, по-видимому, имеет самую большую в мире емкость памяти. Абоненты сети в основном научные сотрудники, которые помимо решения вычислительных задач могут использовать уникальные внешние устройства (например, фотоцифровую печать), единый банк данных. В настоящее время планируется создание в сети управляющей системы, организующей ЭВМ сети для совместной работы над большими задачами.

В Советском Союзе разрабатывается и эксплуатируется ряд сетей, являющихся технической базой АСУ различного назначения. К ним относятся сети для:

функциональных звеньев управления высшего уровня (сеть ВЦ для автоматизированной системы плановых расчетов Госплана, сеть ВЦ Госбанка СССР, сеть Государственного комитета СМ СССР по материально-техническому снабжению и др.);

АСУ Министерства гражданской авиации «Сирена», АСУ Министерства путей сообщения «Экспресс» и др.;

республиканские АСУ и сети отраслевых АСУ.

Электронные вычислительные машины в этих сетях работают а режиме разделения времени и пакетной обработки информации. В качестве примера рассмотрим работу АСУ Министерства приборостроения «Прибор». Технической базой системы является комплекс ЭВМ третьего поколения и средств передачи данных, позволяющих получать, обрабатывать в передавать информацию от абонентов — предприятий отрасли (всего абонентов более 100).

Процесс оптимизации плана, выполняемый АСУ «Прибор», представляет собой итеративный процесс построения равнонапряженных планов как для объединений отрасли, так и для предприятий каждого объединения. Критерием оптимизации является максимум прибыла при заданных народнохозяйственных потребностях.

Для проведения оптимизационных расчетов при составлении текущих и перспективных планов необходимо проводить обмен информацией о нормативах между АСУ предприятия и отрасли (агрегация нормативов снизу вверх). Технические средства АСУ «Прибор» позволяют осуществить обмен информацией, записанной на машинные носители,

на которых хранятся соответствующие массивы нормативной информации.

В главном вычислительном центре системы АСУ «Прибор» на ЭВМ составляются планы экспортных поставок, производится контроль за их выполнением и выполнением плана поставок на внутренний рынок,

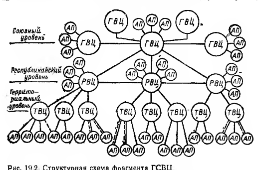


Рис. 19.2. Структурная схема фрагмента ГСВЦ

ГВЦ — главный вычислительный центр; *РВЦ* — республиканский ВЦ; *ТВЦ* — территориальный ВЦ; АП — абонентские пункты; сплошные линии — автоматизированные каналы связи; пунктир — неавтоматизированные каналы связи.

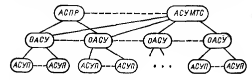


Рис. 19.3. Схема взаимодействия АСУ.

прогнозируется потребность народного хозяйства в вычислительной технике и средствах автоматизации.

Государственная сеть вычислительных центров, создаваемая в СССР (ГСВЦ), будет представлять собой гигантскую по своим масштабам территориально-распределенную информационно-вычислительную сеть общего назначения, выполняющую вычислительные работы, информационное обслуживание и автоматизированное взаимо-

действие различных абонентов как с собственными ВЦ, так и базирующихся только на ресурсах ГСВЦ. Она будет иметь три уровня: союзный, республиканский и территориальный. На рис. 19.2 представлена структурная схема фрагмента ГСВЦ.

К союзному уровню относятся Главные вычислительные центры (ГВЦ) и АСУ союзного уровня. Автоматизированная система управления союзного уровня — это автоматизированная система плановых расчетов (АСПР) Госплана СССР, АСУ Госснаба СССР, АСУ Госкомитета по науке и технике СССР (АСУНТ), АСУ ЦСУ СССР (АСГС), АСУ Госстроя СССР (АСУС), АСУ Госкомитета труда и зарплаты (АСТЗ), АСУ Госкомитета цен (АСОИЦ), АСУ Министерства финансов и Госбанков (АСФЮ), ОАСУ союзных в союзно-республиканских министерств и ведомств. Схема взаимодействия АСУ приведена на рис. 19.3.

Создание ГСВЦ позволит организовать централизованные проблемно-ориентированные фонды алгоритмов и программ на определенных вычислительных центрах, что значительно сократит расходы на разработку математического обеспечения АСУ. Объединение АСУ в единую систему средствами ГСВЦ позволит создать единые информационные базы для всех предприятий одной отрасли.

19.4. ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В СЕТЯХ

Передача данных в информационных сетях осуществляется на основе *коммутации каналов и коммутации сообщений.*

Коммутация каналов представляет собой соединение источника и получателя информации специально выделяемым на время сеанса связи каналом. Она выгодна при передаче большого объема информации и применяется на сравнительно узкополосных каналах, в основном на уровне подсоединения пользователя к сети, например между терминалами и сетью.

Для более быстрой передачи значительных объемов информации по телефонным и более широкополосным каналам связи применяется коммутация сообщений. Система связи с коммутацией сообщений работает в режиме разделения времени между несколькими или многими пользователями.

Коммутация сообщений осуществляется специализированными мини-ЭВМ, установленными в центрах коммутации сообщений (ЦКС). Каждый такой ЦКС выполняет следующие функции: управление приемом данных из линий связи, кодирование и декодирование принимаемых сообщений, контроль ошибок, повторение передач при сбоях, маршрутизация сообщений и др.

Отметим, что к важным факторам математического обеспечения ЦКС, влияющим на пропускную способность децентрализованной се-

ти связи, относится выбор алгоритмов маршрутизации сообщений в управления линиями связи.

В настоящее время наиболее перспективный вид связи — это связь между различными ВЦ с помощью искусственных спутников Земли. Передача данных через искусственные спутники позволяет объединить вычислительные центры в единую супер-ЭВМ, в которой скорость передачи информации по каналу связи достигает 7 Мбит/с.

Концентраторы сообщений. Для сопряжения периферийной линии связи или подсети связи, имеющих меньшую пропускную способность, с широкополосной сетью связи служит устройство, получившее название концентратора сообщений. В настоящее время в сетях применяются концентраторы, построенные на основе мини- и микро-ЭВМ.

Применение концентраторов позволяет снизить арендную плату за каналы связи, что стало главным экономическим фактором, определившим их внедрение. Так, аренда телефонного канала стоит только в 2 раза дороже арендной платы телеграфного канала, в то время как полоса частот и пропускная способность телефонного канала примерно в 20 раз больше. Концентратор принимает и передает информацию пользователей по низкоскоростным каналам связи и пакетирует ее для передачи на большие расстояния по каналам связи с большей пропускной способностью.

Концентрация включает в себя эффект статистического сглаживания и выравнивания трафика, что позволяет существенно увеличить число терминалов, работающих на высокоскоростной канал связи. В некоторых сетях концентраторы также предварительно обрабатывают данные. Это уменьшает число элементов сопряжения в медленно действующей подсети связи.

Одновременно концентратор может выполнять и другие функции, например:

хранение информации в концентраторе с целью передачи по каналам связи только изменившихся данных (новой информации);

временное сжатие или растяжение данных;

дистанционный опрос терминалов;

коммутация сообщений;

ускорение или замедление работы терминалов в зависимости от суммарной нагрузки на концентратор;

сбор статистики и образование очередей сообщений.

Связные процессоры. Как говорилось ранее, основные, т. е. высокопроизводительные, ЭВМ сети экономически невыгодно загружать функциями передачи данных, связанными с управлением потоками передаваемой информации. Для выполнения этих функций целесообразнее выделять специализированные, менее производительные ЭВМ — связные процессоры.

По выполняемым функциям связные процессоры подразделяются на четыре группы:

концентраторы, уплотняющие (выравнивающие) информационный поток ряда низкоскоростных каналов связи в общий высокоскоростной трафик;

дистанционные терминальные концентраторы, управляющие группой удаленных терминалов;

коммутаторы сообщений, принимающие и анализирующие заголовки сообщений. В результате анализа заголовков коммутаторы направляют сообщения по требуемым маршрутам дальше;

оконечные процессоры, согласующие информационные ЭВМ с системой связи (по входу и выходу, скорости функционирования).

Связные процессоры, выпускаемые промышленностью, во многих случаях одновременно выполняют несколько из перечисленных функций. Так, терминальный процессор сети АРПАНЕТ одновременно выполняет все четыре перечисленные функции.

Целесообразность установки связных процессоров подтверждается тем, что без такой специализированной ЭВМ основные ЭВМ расходуют 15—30 % машинного времени на решение задач передачи данных, связанных с функционированием системы связи. После установки связного процессора (мини-ЭВМ) машинное время основных ЭВМ на решение задач связи уменьшается до 1—4 %. Кроме того, резко сокращаются потребности памяти в основной ЭВМ, занимаемой задачами связи, что также не менее важно. Поэтому в существующих сетях число связных ЭВМ и продолжает возрастать.

Так связной процессор в АРПАНЕТ решает следующие задачи:

устанавливает связь между вычислительными центрами;

производит коммутацию сообщений с задержкой 10 мс;

сигнализирует всей подсистеме связи о неисправности его вычислительного центра;

производит входную обработку сообщений (буферизацию, формирование головной метки, надежностные процедуры);

определяет маршрут следования сообщения.

19.5. СЕТИ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Сетью телемеханики называется сеть с ЭВМ, функционирующая с системами телемеханики в реальном масштабе времени.

К характерной особенности сетей телемеханики, отличающей их от сетей на верхних рангах иерархии, относится функционирование таких сетей в реальном масштабе времени. Это обусловлено оперативным характером значительной части телемеханической информации. Програм-

мное обеспечение позволяет осуществлять сбор, передачу, выдачу управляющих воздействий, программно-логическое управление и отображение информации в реальном масштабе времени. В сетях телемеханики создаются многомашинные комплексы также с использованием программных методов.

Продолжая аналогию между развитием энергосетей и информационных сетей отметим, что сейчас единые энергосети имеют настолько массовый характер, что вырабатываемой ими энергией пользуется каждый человек на работе, дома и в общественных местах. В течение ближайших пятилеток аналогичные возможности создадут и быстроразвивающиеся разнообразные информационные сети. Каждый человек сможет пользоваться услугами информационных сетей на работе, дома и в общественных местах.

С этой целью происходит развитие информационных сетей также на самых нижних ступенях иерархии для обслуживания каждого человека. Процесс массового внедрения будет ускорен с широким применением световодных каналов связи (§ 4.4).

В домашних условиях одним из терминалов будет служить телевизор с приставкой, имеющей устройство с микропроцессорным набором и клавишами. Человек сможет общаться со специализированными ЭВМ, используя их интеллектуальные возможности и банки данных, например получать следующие виды обслуживания:

справки из банков данных по самым разнообразным вопросам (историческим, научным, из сферы обслуживания, медицины и т. д.);

играть с машиной в шахматы и другие игры с указанием на допущенные им ошибки (при желании человека);

более эффективно обучаться в самых разнообразных областях и на различном уровне подготовки. Время обучения при этом сократится в несколько раз;

советоваться с машиной по прогнозированию процессов в наиболее важных для человека сферах деятельности;

выполнять многие функции работы в домашних условиях, что приведет к сокращению рабочего времени;

осуществлять эффективный контроль и диагностику многих процессов (производственных, биологических, медицинских и др.);

осуществлять функции видеотелефона.

Процесс внедрения информационных сетей и их использование на рабочих местах происходит наиболее интенсив-

но Создаются информационные сети для нижних рангов иерархии на основе систем телемеханики с наборами микро-ЭВМ на основе управляющих вычислительных телекомплексов (УВТК), выпускаемых заводами отрасли телемеханики (§ 18.6).

Если информационные сети с ЭВМ на верхних ступенях иерархии имеют в основном децентрализованную структуру (см. гл. 6), то сети телемеханики для нижних ступеней иерархии должны иметь, главным образом, централизованную структуру. Тем не менее уже сейчас в отдельных сетях телемеханики на основе УВТК со встроенными в них микро-ЭВМ применяются децентрализованные структуры с подключением к общей магистрали многих УВТК, с самостоятельными функциями каждого из них и с потоками обмена информацией между комплексами. Это свидетельствует о высоком уровне развития сетей телемеханики.

В историческом плане сети телемеханики начали формироваться в СССР сначала в энергосистемах. Они отражали иерархический характер управления в энергетике с районными и диспетчерскими службами более высокого ранга.

Автоматизированная система диспетчерского управления энергосистем (АСДУ) является частью отраслевой автоматизированной системы ОАСУ «Энергия» [44]. Основные функции АСДУ заключаются в оперативном централизованном управлении ведением режимов производства и распределения электроэнергии. Функции центров управления выполняют диспетчерские пункты энергосистем, энергообъединений и ДП центрального диспетчерского управления ДП ЦДУ ЕЭС, оборудованные средствами телемеханики и ЭВМ.

Средства телемеханики и ЭВМ помогают диспетчерам обрабатывать очень большой объем информации, необходимой для оптимального поддержания режимов, выдачи инструкций поведения и советов диспетчеру в различных ситуациях, включая аварийные, в выполнении необходимых расчетов по планированию работы тепловых, гидро- и атомных электростанций, энергосистем и объединений, составлению графиков нагрузок по расчету устойчивости параллельной работы и т. д.

Для выполнения этих целей АСДУ имеет два комплекса на каждом уровне диспетчерского управления: оперативно-информационный комплекс (ОИК), работающий в основном в реальном масштабе времени (в темпе процесса), и

вычислительный комплекс (ВК). Комплекс ОИК построен на базе малых ЭВМ третьего поколения и средних или больших ЭВМ серии ЕС ЭВМ, так что каждый ДП имеет, например, две малые ЭВМ, работающие в дуплексном режиме, и одну среднюю или большую ЭВМ.

Малые ЭВМ непрерывно контролируют производственный процесс и выполняют следующие функции:

автоматический съем информации с выходов устройств телемеханики;

обработку телеинформации;

выдачу информации на средства отображения и регистрации автоматически и по запросу диспетчера;

ретрансляцию информации на ДП более высокого уровня управления;

подготовку информации, включая формирование массивов для большой ЭВМ;

автоматическое регулирование и управление;

анализ некоторых оперативных ситуаций для распознавания аварийных режимов и отображения их на дисплеях.

Большие ЭВМ ОИК выполняют функции оперативных расчетов, включая краткосрочное прогнозирование режимов энергосистем, их оптимизацию и т. д.

Вычислительный комплекс выполняет расчеты по суточному и долгосрочному планированию и прогнозированию режимов работы энергосистем, экономичному распределению нагрузок между электростанциями, расчеты потокораспределения мощности в сетях, расчеты устойчивости и т. д. Некоторые из этих расчетов также требуют высокого быстродействия в темпе процесса (в реальном масштабе времени). К ним, например, относятся расчеты устойчивости в аварийных ситуациях.

Функции автоматического сбора оперативно-режимной информации с энергообъектов выполняются многоканальными кодо-импульсными устройствами ТИ—ТС.

Диспетчер может обращаться к малой или большой ЭВМ в режиме диалога с помощью клавиатуры. Он задает машине вопросы и запрашивает необходимую ему информацию, которая отображается на дисплеях и пульте управления. Команды и приказы управления диспетчер передает с помощью устройств ТУ—ТС или по телефону. В дальнейшем ЭВМ будут работать частично или полностью в автоматическом режиме телеуправления.

Было рассмотрено управление с одного диспетчерского пункта. В реальных условиях сбор информации осущест-

вляется с помощью устройств ТИ—ТС на диспетчерских пунктах нескольких уровней иерархии управления. Расчетная емкость устройств ТИ—ТС на уровне центральной диспетчерской службы (ЦДП) энергосистемы составляет 30 каналов, на уровне объединения ДП 100—120 каналов и на уровне ЦДУ 250—300 каналов.

Расчетные скорости передачи информации ТИ и ТС на различных уровнях также различны и должны относиться примерно как 1 : 3 : 9. При допустимом запаздывании информации около 3—4 с скорость передачи информации должна составлять на уровне ЦДП 100—150 Бод, на уровне ОДП 300—400 Бод и на уровне ЦДУ более 1200 Бод.

Байт								Байт								Байт							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	ПИ	СМ	НС	КИ				
Адрес								Текст								Служебные сигналы							

Рис. 19.4. Последовательность передачи информации в многоканальных устройствах ТИ — ТС.

Дополнительное повышение быстродействия достигается путем введения приоритетов и передачи только новой информации с помощью адаптивных систем телемеханики.

Следует отметить, что минимизация потоков передаваемой информации имеет очень большое значение не только из-за высокой стоимости каналов связи, но и из-за экономии времени ЭВМ верхних рангов, затрачиваемого на прием и обработку телеинформации, особенно в аварийных ситуациях.

В энергосистемах широко применяется ретрансляция наиболее важных сигналов ТИ — ТС для более высоких уровней управления. Для уменьшения погрешностей ретрансляция осуществляется только по методу код — код.

В многоканальных кодо-импульсных устройствах информация снимается с выходных регистров приемника (рис. 19.4). Сначала передается байт адреса параметра ТИ или группы ТС. Затем следует текст — значение параметра ТИ или состояние объектов ТС и в конце передается байт служебной информации:

сигнал предложения информации, сигнализирующей о готовности информации к съему с выходного регистра;

сигнал смены информации, сигнализирующий о смене информации по сравнению с предыдущим опросом;

сигнал несинхронной передачи, сигнализирующий о рассинхронизации распределителей каналов передатчика и приемника;

сигнал контроля исправности телепередачи, сигнализирующий о исправности канала связи, наличии напряжения питания и других общих сигналах.

Для повышения достоверности принятых сигналов контролируются допустимые отклонения относительно расчетных значений и состояний, а также осуществляется семантический контроль сигналов.

В сетях телемеханики применяются комплексы средств концентрации буквенно-цифровой информации типа УВТК—КИ [34], выполняющие примерно такие же функции, как и концентраторы, описанные в § 19.4.

Комплексы КИ резко расширяют доступ большого числа пользователей к ЭВМ, обрабатывающей информацию. Комплекс состоит из абонентской станции и устройства сопряжения ЭВМ с каналами связи, называемого мультиплексором. К разновидности мультиплексора относится устройство, позволяющее образовывать информационные сети передачи данных с различной структурой, выполняющее функции удаленного мультиплексора (телеобработка). Все эти устройства концентрируют информацию в точках их подключения к сети: абонентская станция концентрирует информацию, поступающую от терминалов, а удаленный мультиплексор — в узлах сети.

Перечисленная аппаратура может работать с АПД-Микро и другими АПД, выпускаемыми серийно (см. § 17.2). Эта аппаратура является одним из средств телеобработки данных.

В сетях телемеханики с УВТК четвертого поколения с встроенными в них микро-ЭВМ устройства КП могут брать на себя функции местной автоматики, а также выполнять функции сбора информации от дисплеев. Управляющие вычислительные телекомплексы допускают подключение до 16 дисплеев, удаленных на расстояние до 3 км. Такие комплексы осуществляют обмен информацией между КП и маршрутизацию сообщений. Это позволяет не ограничивать структуру сети. Эффективное использование каналов связи достигается путем спорадических передач всей информации с заданными приоритетами.

В заключение параграфа отметим, что в последние го-

ды в связи с широким развитием роботов в промышленности проводятся работы по созданию сетей телемеханики для роботов, имеющих определенную специфику и большую перспективность.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

20.1. РАЗВИТИЕ ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИИ

Потребность в широком применении методов и средств телеконтроля, телеизмерения и телеуправления впервые возникла в энергосистемах. В последние годы средства телемеханики в Советском Союзе применяются в широких масштабах в энергетике, на железнодорожном транспорте, на нефтепромыслах, газопромыслах, трубопроводах, на промышленных предприятиях, в коммунальном хозяйстве, пожарной и охранной телесигнализации.

По объему телемеханизации на железных дорогах и в нефтедобыче СССР занимает первое место в мире. Телемеханика широко используется также в метеорологии и специальных областях.

В энергосистемах, на нефтепромыслах и на железнодорожном транспорте нашей страны средствами телемеханики оборудовано несколько сотен диспетчерских пунктов в каждой отрасли. Создание диспетчерских пунктов во многих случаях стало целесообразным только с применением средств телемеханики (нефтедобыча, трубопроводы). Энергосистемы занимают сейчас только третье место по суммарному количеству сигналов ТУ, ТС, ТИ.

На железнодорожном транспорте ежегодно телемеханизируются *объекты электроснабжения на дорогах* протяженностью в несколько тысяч километров. Телемеханизация позволила перейти к ремонту сетей электроснабжения, не нарушая графика движения поездов, резко увеличить межремонтный период, уменьшить аварийные простои поездов и высвободить большое количество персонала.

На нефтепромыслах с 1959 г. ежегодно телемеханизируется несколько тысяч нефтескважин, и сейчас более 80 % нефти добывается на телемеханизированных скважинах. Телемеханизация позволила укрупнить и упростить организационную структуру нефтепромысла, резко сократить или отменить вечерние и ночные смены операторов нефтескважин и другого неэффективно используемого обслуживающего персонала, переложив их функции на диспетчера и общую аварийную бригаду. В результате резко увеличился межремонтный период, повысился технический уровень эксплуатации промысла и возросла про-

изводительность труда. Все это дает большой экономический эффект, и капиталовложения на телемеханизацию окупаются за 1,5—4 года.

Средства телемеханики в последние годы начинают все более широко применяться в горнодобывающей промышленности, на крупных промышленных комбинатах, во всех видах транспорта, для охранной сигнализации, в ирригации и других отраслях народного хозяйства. Количество людей, работающих в горнодобывающей промышленности под землей, непрерывно сокращается, и шахты будущего можно представить действующими, по существу, без людей.

Объем внедренных технических средств телемеханики, начиная с первых опытов телемеханики в 30-х годах, увеличивался в Советском Союзе примерно в 10 раз за каждое десятилетие, а темпы развития и в настоящее время еще существенно не уменьшаются. Так, в начале 30-х годов было телемеханизировано примерно десятки КП, в 40-х — сотни, в 50-х — тысячи, в 60-х — десятки тысяч, в 70-х — сотни тысяч, а в настоящее время — более миллиона. Высокие темпы развития телемеханизации, опережающие многие другие отрасли народного хозяйства, закономерны, так как области применения телемеханики продолжают расширяться и в каждой из них повышается технический уровень централизованного контроля и управления. Кроме того, с увеличением числа КП, даже в однотипной системе управления, потоки информации, необходимой для управления (ТУ, ТС, ТИ), возрастают значительно быстрее, чем число КП.

При внедрении телемеханизации достигается:

1) повышение эффективности и надежности контроля и управления за счет введения централизованного управления и устранения этим самым недостатков, обусловленных территориальной разобщенностью объектов,

2) значительный экономический эффект, вызванный упрощением и улучшением технологии, сокращением капиталовложений на строительство, увеличением межремонтного периода, сокращением потерь от аварий и затрат по труду;

3) создание условий для ликвидации малоэффективных, часто вредных для здоровья людей профессий и значительное повышение производительности труда.

Для примера приведем краткий перечень малоэффективных или вредных профессий, которые исчезают с внедрением телемеханизации:

операторы нефтескважин, которые до внедрения телемеханизация круглосуточно (в три смены) обходили скважины;

обходчики на газопроводах и нефтепроводах;

стрелочники на железных дорогах;

дежурный персонал на многих электрических подстанциях;

дежурный персонал на насосных и компрессорных станциях в нефтяной и газовой промышленности и в ирригации;

крановщики строительных кранов;

регулировщики воды на магистральных и других каналах в оросительных системах;

дежурный персонал на многих радиорелейных станциях, других предприятиях и объектах связи;

значительная часть дежурного персонала на вредных предприятиях химической, атомной, металлургической и другой промышленности;

диспетчеры и значительная часть кассиров по продаже билетов на самолеты и поезда;

значительная часть шахтеров и обслуживающего персонала в шахтах.

Если сначала строились простые устройства только телеизмерения или телеуправления — телесигнализация для контроля и управления между двумя пунктами, то в настоящее время устройства и системы телемеханики усложнились во много раз. Они стали комплексными, многофункциональными (ТУ, ТС, ТИ, КК, ПД), работающими по общей линии связи с многими рассредоточенными пунктами совместно с ЭВМ, выполняющими функции оператора. В системы включаются устройства для выделения, статистического сглаживания и предварительной обработки полезной информации, называемые устройствами сбора информации.

Существующая тенденция укрупнения и перехода к комплексным, многофункциональным системам приводят к преобладанию в народном хозяйстве крупных систем управления, состоящих из средств местной автоматики, управляющих ЭВМ и систем телемеханики, или телеинформационных систем, автоматически передающих и предварительно обрабатывающих информацию контроля и управления со встроенными микро-ЭВМ и наборами микропроцессоров.

Развитие и внедрение телемеханизации во многих отраслях народного хозяйства выдвигают на первый план проблему каналов связи, которые являются самой дорогостоящей и дефицитной частью. Системы телемеханики, занимающие сравнительно небольшую территорию в пределах завода, промысла, шахты и т. п., будут и в дальнейшем иметь специализированные каналы связи, принадлежащие данному предприятию или организации. Совсем иной подход должен быть к системам телемеханики с протяженными каналами связи, например в энергообъединениях, на магистральных трубопроводах в ирригации и т. д. В этих случаях канал будет главным образом абонироваться у организаций связи.

В настоящее время создается единая система связи Советского Союза, в которой предусмотрено резкое увеличение емкости линий связи по всей стране — от районной сети до магистральных линий. Единая система связи будет иметь каналы для телеграфа, телефона, телевидения и передачи данных.

С увеличением количества передаваемой информации (ТУ, ТС, ПД, ТИ) во многих системах возрастает эффективность управления из-за лучшей реализации идеального алгоритма управления (трубопроводы, энергосистемы, ирригация и др.). Одновременно с увеличением количества информации возрастает стоимость передачи информации и потери от ненадежности устройств передачи информации. Следовательно, целесообразно оптимизировать количество передаваемой информации, а в некоторых частных случаях — точность телеизмерений по экономическим критериям, излагаемым в следующем параграфе. Оптимизация требует комплексного подхода, а значение ее возрастает с усложнением системы, в особенности при переходе к крупным системам с многоступенчатым управлением.

Создание систем для рассредоточенных объектов и многофункциональных систем телемеханики привело к усложнению структур. Возникли задачи по оптимизации соединительных линий (см. гл. 6 и 19) для многих рассредоточенных объектов при централизованной структуре системы телемеханики, по выбору структурной избыточности для повышения надежности и т. д. На рис. 20.1 иллюстрируется рост максимальной емкости систем телемеханики. Как следует из рис. 20.1, максимальная емкость системы телемеханики за 30 лет возросла в 100 раз.

Рис. 20.1. Максимальная емкость промышленных систем телемеханики.

К важнейшим задачам и проблемам телемеханики относится оптимизация методов кодирования и режимов передачи, которые рассмотрены в гл. 3 и 5. Главным образом из-за недопустимости большого запаздывания при передаче оперативной информации управления возникает иная постановка задачи оптимального кодирования, отличная от аналогичных задач в связи.

Основное внимание в теории информации уделяется построению кодов, реализующих пропускную способность канала связи при кодировании достаточно длинных последовательных сообщений. В теле-

механике в большей степени ограничены допустимое запаздывание и энергия сигнала. При этом принципиально нельзя реализовать пропускную способность канала, так же как невозможно исключить ошибки при однократной передаче информации. Основное внимание поэтому должно уделяться построению кодов и способов их передачи, которые при заданном максимально допустимом запаздывании, количестве передаваемой информации и некоторых ограничениях на сигналы имеют минимальные искажения с учетом влияния различных воздействий на процесс управления. Здесь проявляются положительные свойства адресных передач и кодового разделения сигналов.

Неравноценность разного вида искажений и специфика адресных сообщений приводят также к новым решениям задачи оптимального кодирования. Большое влияние на выбор способа кодирования информации оказывает наличие обратных связей, замыкающихся через управляемый объект. В связи с этим очень важно решение задач оптимального кодирования информации управления с учетом ее характерных особенностей. Примерами таких высокоэффективных решений являются комплексы УВТК (см. § 19.5).

В теории передачи информации управления в настоящее время сформулированы основные проблемы, рассмотрены особенности информации управления, разработаны критерии оценки помехоустойчивости и эффективности передачи, а также комплексные критерии оценки систем передачи информации. Развита теория помехоустойчивости и эффективности передачи при флуктуационных и импульсных помехах, основные положения которой изложены в гл. 5.

Одно из важных направлений телемеханики — изучение возможности использования избыточности сообщений для повышения эффективности и помехоустойчивости передачи. В настоящее время разрабатывается ряд методов использования избыточности сообщений, один из которых — метод статистического кодирования по множеству объектов (источников информации), получивший название временного кодового разделения сигналов (см. гл. 5, 12, 14), позволяет сузать полосу частот, а в сочетании с обратным каналом повысить помехоустойчивость. Задержка передачи информации по времени при таком кодировании возникает редко и тем реже, чем больше избыточность сообщений.

Значительное повышение эффективности использования каналов связи дает использование приоритетов и методов обмена информацией при передаче сообщений ТИ, ТУ, ТС и ПД, рассмотренное в § 18.5 и 19.5. Системы с приоритетами, с автоматически изменяющейся точностью, помехоустойчивостью, кодовым разделением сигналов и ряд других систем относятся к классу адаптивных систем передачи информации. Построение таких систем телемеханики расширяется и во многих случаях целесообразно.

Рассматривая телеизмерения, телеконтроль и телеуправление в широком плане современного развития, можно сделать вывод, что эта область науки и техники вышла на этап достижения предельных и оптимальных показателей по точности, дальности, эффективности и другим показателям при воздействии различных видов случайных помех. Известно, что оптимальные и предельные показатели при наличии различных случайных помех могут быть реализованы только путем применения статистических методов. Поэтому для современного развития телемеханики характерно все более широкое внедрение статистических методов.

С укрупнением систем телемеханики и возрастанием суммарного количества сигналов ТУ, ТС, ТИ, ТР и ПД значительно увеличивается число возможных способов реализации и разнообразие требований к системам телемеханики. Как нет двух одинаковых крупных объектов телемеханизации, так практически не может быть и одинаковых крупных систем телемеханики с одинаковым числом контролируемых пунктов с одними и теми же сигналами ТУ, ТС, ТИ, КК, ТР и ПД на каждом КП. Поэтому нельзя требовать, чтобы проекты телемеханизации крупных комплексов были одинаковыми.

Все это затрудняет промышленное производство аппаратуры телемеханики и выдвигает как первоочередную задачу разработку рациональных принципов унификации кодов, каналов связи, сигналов, входов и выходов аппаратуры, а также унификацию элементов, блоков, конструкций, структуры систем и требований к аппаратуре. К примерам таких удачных решений следует отнести комплексы четвертого поколения типа УВТК (см. § 19.5).

Основные пути решения таких задач заключаются в широком применении системы ГСП, описанной в гл. 18, и дальнейшем развитии и внедрении ее на заводах отрасли телемеханики. При переходе к крупным системам и комплексам телемеханики к их техническим средствам предъявляются повышенные требования по надежности с обязательной у н и ф и к а ц и е й и т и п и з а ц и е й м о д у л е й, б л о к о в и отдельных устройств, с применением технических средств ГСП.

Рациональное построение крупных систем телемеханики возможно только с широким внедрением интегральных микросхем, микропроцессорных наборов, при унификации, агрегатизации и стандартизации блоков и устройств.

С увеличением информационной емкости возрастает необходимость автоматизации всех процессов сбора, предварительной обработки, передачи и ввода информации в цифровые вычислительные и управляющие машины. Требуется все более тонкая оптимизация структуры и надежности системы, методов сбора передачи и обработки информации не только потому, что в крупной системе управления одни и те же относительные потери вызывают большие абсолютные потери, но и потому, что

предоставляется возможность маневрирования информационными, производственными, финансовыми и другими ресурсами, возможность оптимального планирования, ремонта, реконструкции, разработки мероприятий по совершенствованию и т. п.

Объем необходимой информации при этом растет примерно пропорционально квадрату числа контролируемых и управляемых объектов. Поэтому с увеличением емкости системы целесообразно переходить к другим, более эффективным структурам, методам сбора, передачи к обработки информации.

С автоматизацией информационных процессов в первую очередь становятся полностью автоматическими простейшие информационные системы. Однако чем сложнее и крупнее система, тем больше функций, требующих ответственных решений, выполняет в ней человек, являющийся основным ее звеном.

К таким основным функциям, неотделимым от человека как звена системы, относится, прежде всего, его деятельность, организующая и координирующая работу системы. Однако необходимо учитывать, что человек как звено системы чаще, чем машина, ошибается при выполнении определенных, заранее предусмотренных функций. Так, во многих случаях от 20 до 50 % всех отказов возникают из-за ошибочных действий человека-оператора. В табл. 20.1 приведены сравнительные данные, характеризующие функции человека и машины.

Для эффективной работы человека как звена системы необходимо спроектировать подсистему отображения информации, удобную для ее восприятия (см гл 11).

Для современного развития характерен процесс перерастания систем телемеханики в большие информационные системы управления предприятиями, отраслями и другими крупными объектами. В течение ближайших пятилетий будет создана сложная разветвленная иерархическая сеть крупных информационных систем и сетей телемеханики для трубопроводов, метеорологии, бронирования мест в гостиницах, управления движения самолетов и автомобилей, различных справок, научного планирования в торговле, промышленности, научной, каротажно-геофизической, океанофизической и другой информации, а также для различного вида АСУ и систем для отраслей и госкомитетов

Крупные системы, как отмечалось ранее, отличаются не только большим объемом информации, но, и что не менее важно, качественными ее изменениями: большим разнообразием информации и ее дифференцированием по ступеням управления, срочности передачи и хранения и т д.

На каждой ступени управления используются преимущественно определенные виды информации. Оперативная технологическая информация ТУ, ТС, ТИ, КК, ПД используется главным образом на нижних

Таблица 20.1

Показатели, по которым человек превосходит машину	Показатели, по которым машина превосходит человека
Обнаружение сигналов, имеющих очень низкий энергетический уровень	Способность в течение длительного времени точно выполнять однообразные операции
Обнаружение сигналов на фоне больших шумов	Способность очень быстро реагировать на сигналы
Чувствительность в чрезвычайно широкому диапазону факторов, опознавание образов и их обобщение	Плавное и точное приложение больших усилий
Способность воспринимать необходимые сведения в нужный момент	Способность передавать, хранить и обрабатывать большие массивы информации
Способность выносить суждения при неполной информации о событиях	Способность быстро и с большой точностью выполнять сложные вычисления
Нахождение и использование эвристических методов решения	Чувствительность к факторам, лежащим за пределами чувствительности человека (инфракрасное и другое излучение, радиоволны и т. д.)
Способность реагировать на непредвиденные маловероятные события	Одновременное выполнение разнообразных и большого объема действий с переработкой больших объемов информации
Проявление оригинальности в решении проблем	Нечувствительность ко многим посторонним факторам
Способность менять способ действий с учетом прошлого опыта	Способность действовать в условиях, вредных или невыносимых для человека
Способность к действиям в условиях перегрузки	

ступенях, на которых происходит более частое непосредственное вмешательство в работу машин и установок. На верхних ступенях управления вся информация передается в унифицированной цифровой форме в виде документов. Распоряжения подчиненным пунктам здесь даются главным образом на основе обобщенных показателей и более редко.

В иерархических системах появляются новые устройства для согласования работы устройств на различных ступенях управления, в том числе для перехода с различных языков, часто используемых на разных ступенях управления. Рациональные решения здесь должны быть комплексными с приближением к оптимальным парамет-

рам по многим упомянутым показателям функционирования информационных систем.

С применением ЭВМ и средств телеавтоматики резко повышаются требования к надежности передачи сигналов ТС и ТИ при таких же высоких требованиях и надежности передачи команд ТУ. Система телемеханики или информационная система по сложности и количеству деталей соизмерима с ЭВМ, обрабатывающей информацию, но работает в более тяжелых климатических условиях и без дежурного персонала на контролируемых пунктах. Это необходимо учитывать при проектировании систем телемеханики.

20.3. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

При сравнении вариантов решения разрабатываемой и проектируемой технической задачи возникает необходимость объективной их оценки. Трудности сравнения возможных решений резко возрастают с увеличением сложности систем, создаваемых для производственных и других процессов. При этом большое число разнообразных, трудносопоставимых параметров затрудняет как анализ, так и их сравнение

Характер критериев оценки и их значение во многом определяются видом решаемой задачи, зависят от цели, которую при этом стремятся достигнуть. Если рассматривается качество системы, то всегда подразумевается наличие типовой задачи, для которой предназначено решение. В ряде случаев приходится учитывать воздействие случайных факторов на разрабатываемую систему. Успех оптимизации, как правило, зависит не только и даже не столько от точности модели функционирования и совершенства математического аппарата, сколько от выбранного критерия оценки системы как показателя ее качества.

Применяются два подхода к выбору критериев оптимальности системы

1. Из множества параметров системы выбирается один критерий (показатель), который субъективно или объективно считается наиболее важным, при этом на другие показатели накладываются ограничения, т. е. математическая задача сводится к нахождению условного экстремума.

2. На основе множеств исходных параметров выбирают некоторый обобщенный критерий, более полно характеризующий систему. Такая задача часто сводится к нахождению безусловного экстремума. В качестве примера критериев при первом подходе используются такие параметры, как быстродействие, точность, масса, стоимость и др. Эти критерии широко применяются, например, при оптимизации классических систем автоматического регулирования.

Однако если нахождение безусловного экстремума следует признать обязательным, то для большинства систем такими требованиями

удовлетворяют только экономические критерии. Экономические критерии получили широкое применение для оценки сложных систем еще и потому, что они сами по себе входят в число важнейших показателей.

Таким образом, экономические критерии являются наиболее общими показателями качества функционирования системы. Однако единого мнения о виде экономических критериев оценки в настоящее время еще нет. В качестве экономических критериев применяются, например, срок окупаемости, приведенные затраты и полные затраты:

срок окупаемости

$$\tau = C/(B - W_э); \tag{20.1}$$

приведенные затраты

$$W_п = C + \tau_н W_э; \tag{20.2}$$

полные затраты

$$W = C + T_c W_э, \tag{20.3}$$

где C — единовременные капитальные затраты, в период установки системы; $W_э$ — эксплуатационные расходы (потери) в единицу времени; B — положительный экономический эффект в единицу времени, получаемый от внедрения системы (в денежных единицах); $\tau_н$ — нормативный срок окупаемости; T_c — срок службы (предполагаемый или нормируемый срок использования) системы.

Из анализа (20.1) следует, что при внедрении новой техники, технически менее совершенной, менее капиталоемкий вариант всегда имеет преимущества по сроку абсолютной окупаемости. Так, при $C \to 0$ (например, только ручной труд) $\tau \to 0$, что затрудняет сравнение систем. В ряде случаев вычисляют среднее потери $W_э(t)$ как математическое ожидание части выходного эффекта $Э(t)$, которые теряются из-за неидеальной работы системы, т. е. с учетом ненадежности, точности и т. д.

Показатели среднего выходного эффекта и средних потерь связаны соотношением

$$Э + M = Э_0, \tag{20.4}$$

где $Э_0$ — идеальное значение среднего выходного эффекта (безотказная система с идеальным техническим обслуживанием).

При сравнении различных вариантов системы удобно использовать критерий полных затрат с учетом среднего выходного эффекта. Из (20.3) и (20.4) получим:

$$W = C + T_c [W_э + \overline{Э}_0 - \overline{Э}], \tag{20.5}$$

где $\overline{Э}$ — средний положительный эффект в единицу времени, получаемый от использования системы и выражающийся в денежных единицах, $\overline{Э}_0$ — значение показателя $\overline{Э}$ для идеальной системы.

Следовательно, критерий полных затрат наиболее адекватен обоб-

щенным экономическим категориям, таким, как минимум затрат потребного общественного труда или прибыль, которые считаются основными показателями экономической эффективности материального производства

Для применения критерия полных затрат с целью оптимизации системы необходимо определять частные зависимости от параметров системы. Так, если $A = (\alpha_1, ..., \alpha_n)$ — множество параметров системы, то критерий полных затрат применительно к информационным системам, можно записать в виде

$$W(A) = C(A) + T_c [\bar{W}_э(A) + \bar{Э}_0 - Э(A)]. \qquad (20.6)$$

Для сложных информационных систем оптимизация может быть успешной с учетом надежности системы. Выделяя показатель надежности системы P из общего множества параметров A, получим:

$$W(P, A_p) = C(P, A_p) + T_c [\bar{W}_э(P, A_p) + \bar{Э}_0 - Э(P, A_p)], \qquad (20.7)$$

где A_p — множество параметров системы без показателя надежности.

Качество функционирования систем зависит от многих факторов, в том числе и от надежности отдельных частей системы. Связь между качеством функционирования и надежностью системы может быть установлена двумя путями:

1) оценивают потери качества функционирования из-за недостаточной надежности системы и ее элементов;

2) при определении порога работоспособного состояния системы принимают установленный заранее процент потерь качества функционирования (эффективности). Тогда выход реализаций случайных процессов $X(t)$ за границу допуска будет соответствовать отказу системы, пересечение границы допуска отказу системы, а пересечение границы допуска в обратном направлении — восстановлению работоспособности. По времени возникновения отказа и восстановления системы можно определить общепринятые показатели надежности.

Следовательно, для перехода от рассмотрения качества функционирования к рассмотрению надежности системы следует ввести определения работоспособного и неисправного состояний системы. Это необходимо в связи с тем, что соотношение между показателями надежности и качеством функционирования системы может изменяться в широких пределах.

Так, показателем надежности систем телемеханики обычно регламентировалось время наработки на отказ для различных эксплуатационных условий. Это не вызывало сомнений для широко распространенных ранее сравнительно простых устройств телеуправления и телесигнализации и одноканальных устройств телеизмерения.

Переход к многофункциональным, многонаправленным телеуправляемым комплексам потребовал более четкой характеристики надеж-

ности для сложного комплекса аппаратуры. Если время наработки на отказ определяет надежностные характеристики самой аппаратуры, то коэффициенты простоя q и готовности e соответственно равны:

$$\varsigma = \tau/(T+\tau); \quad e = T/(T+\tau),$$

где T — среднее время между отказами; τ — среднее время восстановления аппаратуры, которое характеризует, кроме того, и организацию эксплуатации этой аппаратуры. Среднее время восстановления аппаратуры зависит от числа и мест расположения ремонтных бригад, наличия специальных транспортных средств для их доставки на отказавший контролируемый пункт, наличия и качества сервисной аппаратуры для определения отказавших блоков в устройстве и способов восстановления блоков.

Время наработки на отказ и коэффициент простоя характеризуют надежность аппаратуры и уровень организации ее эксплуатации, но не определяют, достаточны ли эти факторы для эффективного функционирования системы, оправдают ли себя дополнительные расходы на увеличение наработки на отказ и уменьшение коэффициента простоя.

В связи с этим получили применение экономические критерии как показатели надежности сложных систем. На основе критериев средних и полных потерь устанавливается связь между структурами информационных систем и их надежностью [45]. Принимаются следующие ограничения: отказы взаимонезависимы, длительность информационной посылки постоянна и существенно меньше паузы между посылками, информационный поток пуассоновский, поток отказов стационарен и подчиняется пуассоновскому закону, время восстановления распределено по экспоненциальному закону.

В практике исследований надежности расчеты базируются на экспоненциальном законе. Из теории вероятностей в теорию надежности перешло выражение

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}, \qquad (20.8)$$

где $R(t)$ — так называемая интегральная функция распределения вероятности безотказной работы; $\lambda(t)$ — известная интенсивность отказов элементов, которая в общем случае является функцией, зависящей от времени. Учитывая очень сложные механизмы отказов, из нормального времени использования элемента исключаются все ранние отказы (так называемые систематические отказы) и учитываются лишь случайные отказы и отказы в период нормальной эксплуатации. Подставляя в (20.8) значения λ=const, получаем экспоненциальное распределение:

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \qquad (20.9)$$

Уравнение (20.9) широко применяется для оценки надежности, исходя из следующих соображений:

оно наглядно для технических задач;

расчеты легко доступны для инженеров;

последующее поведение определяется только интервалом времени и не зависит от предшествующего времени.

К моменту времени t_1 вероятность безотказной работы

$$R(t_1) = e^{-\lambda t_1}. \qquad (20.10)$$

К моменту времени $t_2 = t_1 + \Delta t$ вероятность безотказной работы

$$R(t_2) = e^{-\lambda(t_1+\Delta t)}. \qquad (20.11)$$

Вероятность безотказной работы в интервале времени $(t_1, t_1+\Delta t)$ вычисляется из выражения

$$R(t_1, t_1+\Delta t) = R(t_2)/R(t_1) = e^{-\lambda(t_1+\Delta t)}/e^{-\lambda t_1} = e^{-\lambda\Delta t}. \qquad (20.12)$$

Применение экспоненциальной функции для оценки надежности системы допустимо в том случае, если $\lambda \approx \mathrm{const}$, т. е. отказы элементов системы имеют случайный характер.

Принятое допущение $\lambda = \mathrm{const}$ и отсутствие последствий зачастую спорны применительно к проблеме технической надежности.

20.4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

На начальных этапах развития систем телемеханики, когда еще не были созданы и серийно не выпускались современные электронные технические средства, каждый раз приходилось их разрабатывать индивидуально для каждой конкретной системы. В то же время средства создавались в основном на базе релейно-контактных элементов и вакуумных электронных ламп, т. е. тех «кирпичей», из которых строилось «здание». Системы телемеханики получались громоздкими, значительно менее надежными в работе, выполняли небольшой объем простых функций и разрабатывались годами.

С развитием систем и усложнением решаемых задач индивидуальный подход к созданию технических средств приводил к тому, что разработка, наладка и ввод в эксплуатацию сравнительно сложной системы требовали многих лет напряженной работы больших коллективов специалистов. В результате система часто устаревала к моменту пуска в эксплуатацию и не соответствовала современному уровню быстро развивающейся области техники. Стоимость разработки индивидуальных технических средств также была непомерно большой, что сдерживало широкое внедрение телемеханики.

Для выхода из создавшегося положения радикальное решение заключалось в переходе к типовым рядам унифицированных техничес-

ких средств, выпускаемых серийно, из которых можно было бы строить самые разнообразные системы. Основное направление при этом — система ГСП. Здесь полезно провести аналогию со строительством зданий и комплексом систем человека. При современном состоянии строительной техники на заводах серийно выпускается не только большой ассортимент строительных материалов, но и целые типовые железобетонные конструкции, блоки квартир, санитарная техника, мебель и т.п. Сейчас было бы нелепо строить современное здание и не использовать серийно выпускаемых стройматериалов, конструкций, мебели и т. п. Сроки такого строительства и его стоимость возросли бы в десятки раз, а качество здания может быть хуже, так как его составляющие еще не испытаны в эксплуатации.

Переходя ко второй аналогии, необходимо заметить, что очень сложный и многоцелевой комплекс систем человека—измерительных, регулирующих физические и химические параметры (давление, состав крови и т. д.), диагностических и др.—возник на основе типовой элементной базы—ограниченного ряда специализированных клеток и их образований.

Так, чувствительными органами (первичными преобразователями) информационно-измерительных и диагностических систем человека служат специализированные входы нервных окончаний, чувствительные к давлению (осязание), запахам (обоняние), звуковым колебаниям (слух), световым колебаниям (зрение), температуре окружающей среды, нормальному функционированию органов и др. Каналами связи являются типовые нервные волокна. Устройствами сбора и распределения информации, уплотнения каналов, а также хранения, поиска и обработки информации служит значительный ряд нейронов различного назначения. У человека также есть несколько типов выходов нервных окончаний, возбуждающих мышцы на их сокращение при передаче команд управления.

Технические средства и их элементную базу нельзя рассматривать как нечто установившееся, незыблемое. Они быстро развиваются и изменяются одновременно с совершенствованием систем. В своем развитии элементная база уже претерпела несколько радикальных изменений и продолжает совершенствоваться.

При переходе на интегральные микросхемы радикально изменяются принципы проектирования устройств телемеханики, т. е. примерно так же, как при переходе от старых к новым индустриальным способам строительства (на основе типовых стройматериалов и строительных изделий, выпускаемых промышленностью). Принципы проектирования систем телемеханики с переходом на микросхемы и микропроцессоры приобретают индустриальный характер и базируются на следующих четырех типовых серийно выпускаемых промышленностью технических средствах:

1) элементная база в виде серий микроэлектронных схем;
2) микропроцессорные наборы;
3) типовые конструкции для размещения технических средств с типовыми соединениями между микросхемами, платами, субблоками и блоками;
4) типовые периферийные устройства (первичные преобразователи, исполнительные органы, ЭВМ, устройства регистрации и отображения информации). Для соединения между функциональными блоками и устройствами применяется интерфейс, определяющий объем и требования к сигналам между функциональными блоками и устройствами.

На ранних этапах развития устройств телемеханики из большого многообразия при проектировании выбирались электронные схемы, например на транзисторах, проводились расчет и экспериментальная отработка функциональных узлов и элементов в виде триггеров, импульсных генераторов, логических элементов и т. п. Затем после макетирования выбиралась и разрабатывалась индивидуальная конструкция устройства. При переходе на микросхемы этапы проектирования существенно изменяются. При индустриальном проектировании нет необходимости рассчитывать и экспериментально отрабатывать подавляющее большинство функциональных элементов и узлов в виде логических схем, триггеров, счетчиков, диодных матриц и т. п.

Такие типовые взаимосочленяемые функциональные элементы и узлы есть в сериях микроэлектронных схем, выпускаемых промышленностью. Известны также взаимные нагрузочные способности микросхем. Кроме того, для размещения микросхем разработаны и выпускаются типовые конструкции, в которых микросхемы размещаются на типовых платах и образуют типовые конструкции модулей, субблоков и блоков.

В настоящее время макетирование и экспериментальная отработка нужна не на уровне простейших функциональных элементов и узлов, а на уровне более крупных образований из микросхем—функциональных блоков и узлов.

При выборе принципов построения систем телемеханики в подавляющем большинстве случаев необходимо предпочитать устройства, которые могут быть реализованы на микросхемах. И если выбирается устройство не на микросхемах, то в проекте необходимо дать обоснование такого нетипового выбора

Универсальные серии дискретных функциональных элементов на полупроводниках целесообразно использовать при проектировании частных устройств, которые нецелесообразно выполнять на микросхемах. Необходимо требовать обоснование этого.

Составление принципиальной схемы устройства телемеханики на микросхемах состоит из следующих этапов

1) выбор типовой серии микросхем, выпускаемых промышленностью, и интерфейса;

2) группировка и деление функциональной схемы каждого блока на микросхемы;

3) разделение схемы каждого блока на субблоки;

4) составление принципиальных схем субблоков и блоков.

На этапе разделения схемы блока на конструктивные единицы (субблоки) рекомендуется руководствоваться следующими правилами.

1. Схему блока разделять на субблоки так, чтобы в результате разделения получить минимальное число субблоков-каркасов и соединений между ними, а также наименьшее число разновидностей (типов) плат и субблоков.

Оптимальное решение этой задачи может потребовать значительного объема кропотливой работы.

2. На каждом субблоке целесообразно предусмотреть резервное место для размещения нескольких микросхем. Такая необходимость может возникнуть во время макетирования и наладки схемы или при опытной эксплуатации устройства.

3. При размещении микросхем, плат, субблоков и модулей целесообразно выбирать субблоки одного размера.

20.5. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В этом параграфе излагаются основные принципы проектирования и эксплуатации устройств телемеханики. Проектирование устройств и систем телемеханики, как правило, состоит из следующих трех основных этапов:

1) составление технического задания (ТЗ);

2) эскизное проектирование;

3) техническое проектирование.

Второй и третий этапы выполняются проектировщиками, а успешное их выполнение часто зависит от активного участия исполнителя, совместно с заказчиком, в составлении и согласовании технического задания. Недооценка первого этапа приводит к составлению нереальных или нерациональных требований как по существу задания, так и по срокам его выполнения. На этапе составления ТЗ проектировщики должен изучать особенности проекта, объем выполняемых работ и возможные трудности проектирования.

Составление ТЗ целесообразно начинать с ознакомления проектировщиков с техническими или другими объектами, для которых предназначен проект, и с требованиями, предъявляемыми к нему заказчиком. Для этого заказчик, как правило, выдает «Предварительное техническое задание на проектирование», содержащее характеристику технологического или другого процесса и агрегатов, для которых пред-

назначен проект, назначение устройств телемеханики, схему и территориальное размещение входов и выходов устройств, объем и характер входных и выходных сигналов, типы первичных преобразователей и форму представления информации (если они могут быть выбраны на данной стадии проекта), а также условия работы аппаратуры и возможные каналы связи.

Техническое задание составляется на основе устройств телемеханики ГСП, в котором изложены основные требования к системам, и согласовывается совместно с заказчиком на основе «Предварительного технического задания». На этой стадии необходимы предварительные технико-экономические расчеты нескольких вариантов проекта с различным объемом сигналов телемеханики, позволяющие оценить стоимость системы с минимально допустимой информационной емкостью и стоимостью расширения объема информации. Из опыта проектирования систем телемеханики известно, что технологи, как правило, не знают возможностей реализации проекта и часто завышают объем требуемой информации, недостаточно учитывая при этом, что это вызывает увеличение стоимости системы.

Рационально выбранная система телемеханики должна иметь информационную емкость, превышающую минимально допустимую с учетом возможного расширения телемеханизируемых объектов, или должна быть предусмотрена возможность ее увеличения. Необходимо учитывать, что даже согласованное ТЗ может уточняться на дальнейших стадиях проектирования на основе материалов проекта, т. е. его нельзя рассматривать как нечто неизменяемое.

Лучшие решения, не требующие запасов по информационной емкости, дает проектирование технических средств на основе устройств телемеханики четвертого поколения (см. гл. 18).

Техническое задание должно содержать:

1) назначение и основную характеристику устройств телемеханики;

2) характеристику технологического или другого телемеханизируемого процесса, включая работу его агрегатов и отдельных участков;

3) характеристики первичных преобразователей, устройств, сбора информации, передачи команд, отображения информации и информационной структуры системы;

4) требования к помехоустойчивости, достоверности передачи, надежности, автоматизации процессов оператора и согласования работы с другими устройствами и системами;

5) требования к условиям работы аппаратуры (климатические, размещение и обслуживание, диагностика повреждений и др.).

На этапе эскизного проектирования решаются укрупненные задачи, определяющие, главным образом, стратегию проектирования. На этом этапе должны быть решены вопросы выбора принципов построения системы и определена основная структура системы, про-

стейшими элементами которой являются отдельные подсистемы и блоки, включая требования к ним. На этапе эскизного проектирования должно быть проведено сравнение различных вариантов устройств телемеханики (без деталировки блоков и подсистем) и выбран наилучший вариант. Это одна из главных задач эскизного проектирования.

В объем работ эскизного проектирования включаются:

1) составление структурной схемы информационных потоков;

2) обоснованный выбор основных принципов построения системы, подкрепленный расчетами нескольких вариантов,

3) сравнительный анализ и выбор рациональной, укрупненной структуры (простейшими элементами которой являются подсистемы и блоки);

4) алгоритмическое описание функционирования подсистем и блока. Составление временны́х диаграмм работы;

5) составление функциональных схем блоков;

6) выбор элементной и структурной баз, входных и выходных устройств и средств их сопряжения

Структурная схема информационных потоков составляется только для сравнительно сложной системы телемеханики с целью рационального разделения ее на подсистемы и блоки, а также уточнения объема информации, ее характера на входах и выходах подсистем и блоков.

При составлении структурной схемы информационных потоков можно ограничиться разделением системы на укрупненные блоки, каждый из которых состоит из нескольких блоков (уточняемых на последующих этапах проектирования).

После описания информационных потоков целесообразно перейти к выбору основных принципов построения системы телемеханики, руководствуясь рекомендациями и материалами, изложенными в предыдущих главах.

Путем сопоставления с другими вариантами прежде всего необходимо выбрать:

а) метод разделения сигналов (адресный, многоканальный, комбинированный) и обосновать конкретный метод разделения сигналов;

б) методы организации передачи (циклический, по вызову оператора, при возникновении новой информации, целесообразность и характер приоритетов);

в) типы каналов связи и их основную структуру;

г) последовательность управления (последовательное, параллельное, параллельно-последовательное);

д) принципы синхронизации и управления устройствами и блоками системы.

При выборе основных принципов построения системы необходимо

ориентироваться на определенную элементную базу, однако уточнять ее целесообразно на более поздних этапах.

Далее следует перейти к сравнительному анализу и выбору рациональной структуры системы. Если для многих простых систем телемеханики выбор структуры очевиден, то с укрупнением системы, с расширением и усложнением выполняемых функций научно обоснованная оптимизация структуры во многих случаях становится трудноразрешимой из-за многообразия факторов, ее определяющих. В настоящее время разработаны теория и методика расчета только некоторых вопросов оптимизации структур, например излагаемых в гл. 6 и 7.

Для крупных и сложных систем задачи оптимизации структуры становятся трудоемкими. Их постановка в достаточно полном объеме может быть оправдана только в тех случаях, если система телемеханики должна выпускаться крупносерийно. Следовательно, глубина проработки вопросов оптимизации структуры системы становится зависимой от серийности выпуска и значимости системы. Выбор наилучшего варианта структуры сложной системы в таких условиях зависит от опыта и искусства инженеров-проектировщиков, которые в известной мере конкурируют с научно-обоснованным выбором структуры.

При выборе наилучшей структуры необходимо сравнение по меньшей мере нескольких вариантов, подкрепленных расчетными данными. Для повышения эффективности выбора системы в сопоставлении и выборе вариантов структур системы на основе работы, выполненной проектировщиком, полезно участие заказчика.

К практическим рекомендациям при разработке структуры следует во многих случаях отнести целесообразность уменьшения оперативной взаимосвязи между подсистемами, если это вызывает уменьшение надежности системы в целом и усложняет разработку, наладку и эксплуатацию всей системы. К исключениям относится, например, целесообразность в аварийных условиях перехода на режим с менее глубокой автоматизацией и с выполнением оператором функций, ранее выполняемых поврежденными подсистемами. Во время аварии на человека возлагается при этом большая нагрузка.

Для выбора блоков и подсистем необходимо максимально использовать типовые блоки и устройства ГСП, выпускаемые промышленностью, и максимально сокращать новые устройства, требующие разработки. Такой подход аналогичен выбору типовых решений при проектировании, например, зданий, при которых обеспечивается сокращение стоимости строительства и улучшение других показателей. Более подробно эти вопросы и выбор элементной базы рассмотрены в гл. 8.

Алгоритмическое описание функционирования системы и подсистем выполняется для сравнительно сложных систем телемеханики с разви-

тым параллельно последовательным прохождением информации Техническое проектирование выполняется после утверждения эскизного проекта и имеет целью разработку всей необходимой документации для изготовления или производства системы телемеханики. В результате технического проектирования необходимо выполнить следующие работы:

1) составить принципиальные схемы всей системы и отдельных ее узлов;

2) провести моделирование и лабораторное макетирование всех наиболее сложных и новых блоков и устройств системы;

3) составить схемы компоновки всех устройств системы по шкафам;

4) составить монтажные схемы блоков;

5) составить схему межблочных соединений;

6) написать пояснительную записку с необходимыми расчетами, в которой указывается, в какой степени выполняется ТЗ на систему;

7) проект технических условий на систему;

8) проект технического описания и эксплуатационные инструкции;

9) патентный формуляр;

10) карту технического уровня, включающую сравнение с аналогичными устройствами и обоснование права на существование проектируемого устройства.

Задание на курсовой проект по телемеханике

Цель проекта — закрепление знаний по курсу телемеханики и развитие навыков самостоятельной работы по проектированию и работе с технической и справочной литературой. Проект относится к одной из важных активных форм обучения.

При выполнении проекта студент должен применить знания, полученные при изучении данного и других курсов, творчески использовать эти знания и развить в себе навыки инженерной работы.

Исходные данные к проекту

Проект включает в себя разработку одного из двух вариантов системы с кодовым разделением сигналов:

1) многоканальную кодо-импульсную систему ТИ для сосредоточенных объектов (работа пункт — пункт);

2) цифровую адресную систему ТУ — ТС для двухпозиционных сосредоточенных объектов ТУ и ТС (работа пункт — пункт).

Канал связи дуплексный телефонный с полосой пропускания 300—3400 Гц. Для сигналов ТИ и ТС спектр частот 1500—3400 Гц, а для сигналов ТУ 300—1200 Гц. Сигналы ТИ, ТУ, ТС передаются независимо. Номинальное значение амплитуды сигнала на входе канала 1 В, а на выходе канала 0,2 В. Эффективное напряжение флуктуационной помехи в полосе фильтра на выходе канала 0,05 В. Сигналы ТУ и ТС разделяются по спектру полосовыми фильтрами

Таблица П1.1 ТИ

Параметры	Варианты			
	1	2	3	4
Число первичных преобразователей с выходным напряжением 0—1 В	5	10	15	20
Качественный признак при выделении элемента сигнала 0 и 1	Амплитудный	Частотный	Длительность импульса	Частотный
Код в канале связи	Двоичный с защитой кодом Хемминга	Двоичный с защитой циклическим кодом	Двоично-десятичный с защитой кодом Хемминга	Двоично-десятичный с защитой циклическим кодом
Приведенная погрешность, %	0,5	1	0,5	1
Помехоустойчивость (категория ГОСТ, см. табл 5 1)	2	3	3	2

Таблица П1.2 ТУ—ТС

Параметры	Варианты			
	1	2	3	4
Число двухпозиционных объектов ТУ	5	10	15	20
Число двухпозиционных объектов ТС	10	15	20	20
Код в канале связи	Двоичный с защитой кодом Хемминга	Двоичный с защитой кодом Хемминга	Двоично-десятичный с защитой циклическим кодом	Двоично-десятичный с защитой циклическим кодом
Модуляция в канале связи	КИМ—ЧМ	КИМ—АМ	КИМ—ЧМ	КИМ—АМ
Помехоустойчивость (категория ГОСТ, см. табл. 5.1	2	2	3	3

Элементарная база систем — интегральные микросхемы типовых серий. В проекте необходимо обосновать выбор интегральных микросхем.

Исходные данные для варианта 1 (ТИ) и варианта 2 (ТУ—ТС) проекта задаются, например, из табл. П1.1 или П1.2 преподавателем индивидуально для каждого студента с целью развития его самостоятельных навыков работы. Поэтому индивидуально для каждого студента в таблице отмечается вариант исходных данных по каждой строке. Такая индивидуальная таблица задания с подписью преподавателя прикладывается к проекту при его защите. Преподаватель может внести индивидуальные изменения в задание на проект (перед подписанием задания).

Для выполнения требований по помехоустойчивости применяется код Хемминга или циклический код в зависимости от индивидуального задания. Синхронизация распределителей стартстопная (циклическая).

Некоторые дополнительные данные, необходимые для проектирования и расчетов или относящиеся к общим техническим данным для устройств телемеханики, выбираются на основе рассмотрения аналогичных устройств из учебной, технической и справочной литературы.

Объем и характер представляемых материалов

Проект включает в себя:

пояснительную записку объемом 25—30 рукописных страниц писчей бумаги (формат 210×297) с обоснованием выбора схем, их описанием и расчетами;

структурную схему системы, функциональные или принципиальные схемы отдельных основных узлов, выполненные на белой чертежной бумаге (1,5—2 листа формата 24);

временные диагрвммы работы системы или ее основной части, вычерченный на миллиметровой бумаге.

Пояснительная записка должна содержать следующие расчеты:

1) генератора импульсов с обоснованием его стабильности по частоте;

2) помехоустойчивости с обоснованием параметров кода Хемминга или циклического кода при обеспечении заданной категории ГОСТ по помехоустойчивости;

3) надежности системы;

4) должно быть дано обоснование серии интегральных микросхем.

Для передачи сигналов ТИ, ТУ, ТС использоаать двухпозиционные коды (0, 1). Сигналы ТС и ТИ передаются циклически. Команды ТУ передаются спорадически. В канале связи передаются последовательные коды. Команды ТУ передаются от ЭВМ, а принимаются исполнительными органами в виде электромагнитных реле. Сигналы ТС передаются от первичных преобразователей ТС и отображаются на табло. На вход системы ТИ сигналы подаются от первичных преобразователей ТИ в виде напряжения 0—1 В. Необходимо выбрать тип АЦП и рассчитать его. Сигналы ТИ отображаются на цифровых индикаторах и вводятся в ЭВМ.

Оформление курсового проекта

Пояснительная записка должна быть написана аккуратно, чернилами, на одной стороне листа. Каждая страница рукописного текста должна быть выполнена в соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Текст каждой страницы должен быть заключен в рамку.

После титульного листа следует поместить оглавление, содержащее заголовки и подзаголовки разделов пояснительной записки.

Далее помещаются технические условия (задание) по выполняемому варианту курсового проекта.

При всех расчетах и систематических преобразованиях необходимо приводить формулы, на основании которых они производятся. Также приводится первоначальная подстановка численных параметров в формулы. Промежуточные вычисления не приводятся. При написании окончательных вычисленных характеристик и параметров должна указываться их размерность.

Пояснительную записку желательно иллюстрировать необходимыми рисунками (например, графиками, принципиальными схемами узлов, не вошедших в чертежные листы, и др.). Эти рисунки нужно выполнять аккуратно на белой нелинованной бумаге, на кальке или миллиметровке, вклеить их в записку там, где имеются соответствующие ссылки в тексте.

В конце записки приводится список использованной при проектировании литературы, включая справочную литературу и каталоги. В списке литературы должны быть указаны: автор, полное названия книги, издательство и год издания.

Графическая часть проекта, как указывалось выше, содержит структурную схему системы, принципиальные или функциональные схемы основных узлов (в зависимости от сложности системы) и конструктивный чертеж, которые выполняются карандашом на листах белой чертежной бумаги.

Все схемы как на листах, так и в записке должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД по действующим ГОСТ на условные графические обозначения в электрических схемах.

Принципиальные и функциональные схемы в курсовом проекте системы ТУ — ТС могут быть выполнены, например, для генератора импульсов и декодирующего узла, а в курсовом проекте системы ТИ — для генератора импульсов и аналого-цифрового преобразователя.

На конструктивном чертеже изображается в масштабе элемент устройства. Таким элементом может быть, например, монтажная плата с печатным монтажом, модуль субблока аппаратуры, цифровой индикатор и др. На конструктивном чертеже указываются габаритные и установочные размеры.

В проекте должна быть приведена спецификация (перечень) аппаратуры (элементов) для рассчитанных узлов. Эта спецификация может быть помещена или на листах принципиальных схем, или в конце пояснительной записки (перед списком литературы).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Примерный перечень лабораторных работ

1. Частотные характеристики линий связи и фильтров и спектры импульсных сигналов.
2. Экспериментальные исследования статистических характеристик флуктуационных помех.
3. Определение вероятности подавления и образования ложных импульсных сигналов
4. Исследование самоходных распределителей.
5. Исследование тактовых распределителей и сдвигающих регистров.
6. Исследование матричных шифраторов и дешифраторов
7. Исследование системы ТУ—ТС с распределительным кодом
8. Исследование цифровой адресной системы ТУ—ТС.
9. Исследование системы ТУ—ТС для рассредоточенных объектов.
10. Исследование элементов частотных систем ТУ—ТС.
11. Исследование кодирующих и декодирующих устройств для кодов с обнаружением и исправлением ошибок (код Хеммнига, циклический код).

12. Исследование время-импульсного или частотно-импульсного преобразователя.
13. Исследование аналого-цифрового преобразователя (АЦП).
14. Исследование цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).
15. Исследование время-импульсной системы ТИ.
16. Исследование многоканальной цифровой системы ТИ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица перевода децибел в отношение мощностей

Отношение мощностей	(−)дБ(+)	Отношение мощностей	Отношение мощностей	(−)дБ(+)	Отношение мощностей
1,0000	0,0	1,0000	0,1000	10,0	10,000
0,8913	0,5	1,122	0,07943	11	12,59
0,7943	1,0	1,259	0,06310	12	15,85
0,7079	1,5	1,413	0,05012	13	19,95
0,6310	2,0	1,585	0,03981	14	25,12
0,5623	2,5	1,778	0,03162	15	31,62
0,5012	3,0	1,995	0,02512	16	39,81
0,4467	3,5	2,239	0,01995	17	50,12
0,3981	4,0	2,512	0,01535	18	63,10
0,3548	4,5	2,851	0,01259	19	79,43
0,3162	5,0	3,162	0,01	20	100
0,2818	5,5	3,548	10^{-1}	10	10
0,2512	6,0	3,981	10^{-2}	20	10^{2}
0,2239	6,5	4,467	10^{-3}	30	10^{3}
0,1995	7,0	5,012	10^{-4}	40	10^{4}
0,1778	7,5	5,623	10^{-5}	50	10^{5}
0,1585	8,0	6,310	10^{-6}	60	10^{6}
0 1413	8,5	7,079	10^{-7}	70	10^{7}
0,1259	9,0	7,943	10^{-8}	80	10^{8}
0,1122	9,5	8,913			

По теоретическим основам телемеханики и каналам связи

1. **Автоматизированные** информационные системы. Сб. под **ред.** В. А. Ильина. — М.: ВЗПИ, 1970. — 359 с.
2. **Алексенко А. Г** Основы микросхемотехники — М.: Советское радио, 1977. — 405 с.
3. **Аркадьев И. Д., Зубовский Л. И., Щербаков Б. Ф. Эксплуатация** систем передачи данных. — М.: Связь, 1980. — 184 с.
4. **Варакин Л. Е.** Теория систем сигналов. — М.: Советское радио, **1978.** — 304 с.
5. **Васильев В. И., Давыдов В. С.** Техника кодирования и декодирования цифровых сигналов телемеханики. — Новосибирск: НЭТИ, **1970.** — 126 с.
6. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Советское радио, 1971. — 512 с.
7. **Давыдов Г. Б., Рогинский В. Н., Толчан А. Я.** Сети электросвязи. — М.: Связь, 1977. — 360 с.
8. **Ильин В. А., Башин Ю. Б.** Информационные сети с ЭВМ. — М.: Знание, 1976. — 64 с.
9. **Ильин В. А.** Телеуправление и телеизмерение. — М.: Энергия, 1974. — 409 с.
10. **Квбальеро А., Касьяненко А. А.** Вопросы синтеза структуры проводных линий связи для информационных систем. — В кн.: Методы построения алгоритмических моделей сложных систем. — Таганрог: ТРТИ, 1977, с. 87—104.
11. **Макаров В. А.** Теоретические основы телемеханики. — Л.: ЛГУ, 1974. — 286 с.
12. **Малиновский С. Т.** Сети и системы передачи дискретной информации АСУ. — М.: Связь, 1979. — 384 с.
13. **Мановцев А. П.** Основы теории радиотелеметрии. — М.: Энергия, 1973. — 443 с.
14. **Немировский М. С.** Цифрован передача информации в радиосвязи. — М: Связь, 1980. — 256 с.
15. **Новоселов О. Н., Фомин А. Ф.** Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. — М.: Машиностроение, 1980. — 280 с.
16. **Основы** волоконно-оптической связи: Пер. с англ. — М.: Советское радио, 1980. — 232 с.
17. **Псковатый Л. Я.** Электрические помехи в системах промышленной **автоматики.** — *М.: Энергия,* 1973. — 104 с.
18. Сети ЭВМ. Под ред. В. М. Глушкова — М.: Связь, 1977. — 280 с.
19. Системы передачи сообщений. Пер. с англ. — М.: Связь, 1976. — 520 с.
20. **Советов Б. Я., Рухман Е. П., Яковлев С. А.** Системы передачи информации от терминалов к ЦВМ. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. — 240 с.
21. **Советов Б. Я.** Теория информации — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. — 184 с.
22. **Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И.** Теоретические основы информационной техники. — М.: Энергия, 1979. — 512 с.

23. Харкевич А. А. Борьба с помехами. — М.: Физматгиз, 1965 — 276 с.
24. Ченцов В. М. Системы распределении информации. Синтез структуры и управлении. — М.: Связь, 1980. — 144 с.
25. Шварацман А. С., Железнов И. Г., Иницкий В. А. Сложные системы. — М · Высшая школа, 1977. — 248 с.
26. Шастови Г. А. Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации. — М.: Энергия, 1966. — 454 с.
27. Шастови Г. А., Коёмин А. И. Выбор и оптимизация структуры информационных систем. — М.: Энергия, 1972. — 256 с.
28. Шеннон К. Работы по теории информации в кибернетике. — М.: Изд-ао иностр. лит., 1963. — 312 с.
29. Электроннап техника в системах управления электротяговых устройств. — Тр. БНИИЖТ, вып. 622. — М.: Транспорт, 1979. — 122 с.
30. Юрасов А. Н. Теория построения релейных схем. — М.: Госэнергоиздат, 1962. — 128 с.
31. Юргенсон Р. И. Помехоустойчивость цифроных систем передачи телемеханической информации. — Л.: Энергия, 1971. — 251 с.

По принципам построения и системам телемеханики

32. Бесконтактные элементы промышленной телемеханики. Комплекс «Спектр». — М.: Энергия, 1973. — 120 с.
33. Бесконтактные устройства телеавтоматизации промышленных предприятий. — М.: Энергия, 1973. — 280 с.
34. Вопросы промышленной кибернетики. — Тр. ЦНИИКА, вып. 62. — М.: Энергия, 1980. — 36 с.
35. Гитис Э. И., Пискунов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи. — М.: Энергоиздат, 1981. — 360 с.
36. Ильин В. А. Большие системы телемеханики. — М.: Энергия, 1967. — 136 с.
37. Ильин В. А., Коншин Б. Н. Импульсные устройства с мостовыми времязадающими цепями. — М.: Энергия, 1972. — 232 с.
38. Карвев Р. А., Лёнин А. А. Сбор и передача информации в АСУ. — М.: Энергия, 1975. — 104 с.
39. Катков Ф. А., Дидын Б. С., Стулов В. А. Телемеханика. — Киев: Вища школа, 1974. — 273 с.
40. Ков Е. Л., Тимошинон П. М., Шехонцов О. Н. Диагностика многотактных телемеханических систем. — Л.: Энергия, 1972. — 120 с.
41. Купершмидт Я. А. Точность телеизмерений. — М.: Энергия, 1978 — 168 с.
42. Линавон Ю. В., Жуков В. М. Телемеханика. — М.: Недра, 1978. — 192 с.
43. Малов В. С., Купершмидт Я. А. Телеизмерение. — М.: Энергия, 1975. — 352 с.
44. Митюшкин К. Г. Телемеханика в энергосистемах. — М.: Энергия, 1975 — 352 с.
45. Пшеничников А. М., Портнов М. Л. Телемеханические системы на интегральных микросхемах. — М.: Энергия, 1977. — 297 с.
46. Тутевич В. Н. Телемеханика. — М.: Энергия, 1973. — 383 с.
47. Фремке А. В. Телеизмерения. — М.: Высшая школа, 1975. — 248 с.
48. Шляндин В. М. Цифровые измерительные устройства. — М.: Высшая школа, 1981. — 335 с.

49. **Автоматизации и телемеханизация** магистральных нефтепроводов. — М.: Недра, 1976. — 256 с.
50. **Ахметов Р. М., Ливанов Ю. В., Матвиенко А. В.** Диспетчеризация и учет на нефтепроводах. — М.: Недра, 1976. — 276 с.
51. **Вострокнутов Н. Г., Евтихиев Н. Н.** Информационно-измерительная техника — М.: Высшая школа, 1977. — 232 с.
52. **Грубов В. И., Кирдан В. С.** Устройства электронной вычислительной техники. — Киев: Вища школа, 1980. — 560 с.
53. **Гутников В. С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах. — Л.: Энергия, 1980. — 248 с.
54. **Кудрицкий В. Д., Синица М. А., Чинаев П. И.** Автоматизация контроля РЭА. — М.: Советское радио, 1977. — 256 с.
55. **Куликовский Л. Ф., Морозов В. К.** Основы информационной техники. — М.: Высшая школа, 1977. — 360 с.
56. **Микропроцессоры.** Основные принципы построения и применения. — М.: Советское радио, 1979. — 320 с.
57. **Митюшкин К. Г., Борисов Г. М.** Устройство телеуправления типа ТМЭ на магнитных элементах. — М.: Энергия, 1970. — 88 с.
58. **Орнатский П. П.** Автоматические измерения и приборы. — Киев: Вища школа, 1980. — 560 с.
59. **Полякова Л. В., Лейн В. М.** Отображение измерительной информации. — Л.: Энергия, 1978. — 144 с.
60. **Пшеничников А. М., Портнов М. Л.** Телемеханические системы на интегральных микросхемах. — М.: Энергия, 1977. — 297 с.
60а. **Рекомендации Международных консультативных комитетов по телефонии и телеграфии.** — М.: Связьиздат, 1959. — 264 с.
61. **Цапенко М. П.** Измерительно-информационные системы. — М.: Энергия, 1974. — 522 с.
62. **Хазвиов Б. И.** Интерфейсы измерительных систем. — М.: Энергия, 1979. — 120 с.
63. **Шибанов Г. П.** Распознавание в системах автоконтроля. — М.: Машиностроение, 1973. — 424 с.
64. **Шишкин О. П., Парфенов А. Н.** Основы автоматики и автоматизации производственных процессов. — М.: Недра, 1973. — 380 с.

А

Аварийная сигнализация 427
Автоматизация 5
Автоматизированные системы управления (АСУ) 6
Адрес источника (приемника) 182
Адресные системы 476
Анализ релейных схем 221
АЦП 311

Б

Бит 60
Бод 130

В

Векторная диаграмма 43
Величина аналоговая 25
— дискретная 25
Видеоимпульс 43
Временное разделение каналов 47
Выбор объекта 401

Г

Генератор импульсов 376
— Роера 376
Герконы 280
ГОСТ для телемеханики 159

Д

Девиация частоты 45
Декатрон 311
Декодирование 77
Демодуляция 295
— частотная 298
Детектирование 40
Детектор 40, 297
Децибел 134, 548
Дешифратор 284, 235
— матричный 235
— частотный 430
Диагностика повреждений 453
Дискретизация 24
Достоверность передачи 159

З

Запаздывание в передаче информации 68, 70
Затухание 134
Защита от искажений 101

И

Избирание сигналов 410
Избыточность 69, 89
Измерение 341
Импульса признаки 410
Индикаторы аналоговые 334
— цифровые 334
Индекс частотной модуляции 32
Интегральные микросхемы 262
Интерфейс 479
Информации отображение 329
— единица измерения 59
— количество 59, 63
— представление, методы 57, 59
Информационные сети 305
— системы 246
Источники информации 58, 82

К

Кабель коаксиальный 133
— симметричный 133
Канал высокочастотный 136
— коммутируемый 128
— связи 30
— телеграфный 130
— телемеханический 130
— телефонный 130
Квантование 27
— по уровню 27
— — — неравномерное 322
— ошибки 28
— шаг 29
Квитирование 156
Классы точности 355
Код 77
— блочный 120
— Грея 91

Код двоично-десятичный 90
— двоичный 80, 86
— единично-десятичный 79
— корректирующий 97
— на сочетания 95
— параллельный 79
— последовательный 79
— равномерный 88
— распределительный 97
— рекуррентный 120
— с обнаружением ошибок 98
— — — и исправлением ошибок 102
— — проверкой на четность 99
— систематический 98
— телеизмерения 85
— телеуправления 93
— Хэмминга 102
— циклический 106
— число-импульсный 79
Кодирование 77
Кодирующий диск 91
Кодовое расстояние 101
Коммутаторы 268
Концентраторы 517
Критерии выбора систем 532

Л

Линии связи воздушные 131
— — кабельные 131
— — параметры первичные 131
— — — вторичные 132
— — радиорелейные 139
— — световодные 140
— — структура 183
Линия связи 128
Логические функции 221
— элементы 224

М

Масштабирование 349
Матрица диодная 235
Микропроцессоры 493
Микроэлектроника 262
Минимизация структур 232
МККТТ 651
МОДЕМ 295
Модулятор амплитудный 296
— частотный 297
Модуляция 32
— амплитудная 32
— амплитудно-импульсная (АИМ) 32
— время-импульсная (ВИМ) 32
Модуляция кодо-импульсная (КИМ) 32
— импульсная многократная 32
— фазовая 32
— частотная 32
— частотно-импульсная (ЧИМ) 32
— широтно-импульсная (ШИМ) 32

Н

Непер 134
Несущая 41
Нуль-орган 313

О

Обзор зарубежных систем 442
Объекты телемеханизации 524
Опрос циклический 182
Отображение информации 329
Ошибки систематические 353
— случайные 353
Ошибок исправление 201, 125
— обнаружение 101
— пакет 120

П

Передача адресная 182
— данных 461
— информации 66, 7
— многоканальная 47
— с обратной связью 127
— — повторением 47
— спорадическая 182
— циклическая 182
Переносчик информации 30
Погрешности телеизмерения 353
Полоса частот 34
Помех источники 145
Помехи аддитивные 142
— атмосферные 243
— импульсные 143
— индустриальные 143
— мультипликативные 142
— флуктуационные 144
Помехоустойчивость 152
— потенциальная 152
— телеизмерения 169
— телеуправления 152, 159
— элементарного сигнала 153
Порог срабатывания 313
Пороговое устройство 313
Преобразование аналог — код 311
— кода Грея в двоичный код 293

Преобразование код — аналог 323
— кодов 28)
— логических схем 233
— перемещение в код 320
— сообщений в сигналы 24
— электрических величин в код 311
Преобразователь время-импульсный 370
Проектирование 536
Пропускная способность канала 76
Пункт диспетчерский 7
— контролируемый КП 7
— управления 7

Р

Радиоимпульс 43
Радиорелейные линии 139
Разделение сигналов 410
Распределитель 268
— магнитный двухтактный 272
— однотактный 272
— матричный 239
— на мостовых элементах 274
Регистр сдвига 286
Режимы работы 406
Реле бесконтактное 271
— частотное 428

С

Световоды 140
Связь 128
Селекция сигналов (см. Избирание сигналов)
Сетки декодирующие 235
Сигнал 2
Сигнализации виды 402
Сигнализация отклонения от нормы 447
Синфазирование 55
Синхроизация 55
— пошаговая 55
— циклическая 55
Синтез логических функций 232
Система информационная 246
— телеавтоматическая 8
— телемеханики 7
— телеуправления 9, 40
Системы передачи данных 461
— счисления 85
— управления автоматизированные (АСУ) 6
Скорость передачи 75
Сообщения 20
Сообщение в телемеханике 20
Сопряжение систем телемеханики с ЭВМ 472
Спектр сигналов 34
— — дискретный 35
— — непрерывный 35
Сокращение избыточности сообщений 179
Структура систем 188
Сумматор по модулю два 102
Суммирование телеизмеряемых величин 358
Схема дискретная 221
— логическая 125
— совпадения 125
Счетчик двоичный 309
— импульсов 308

Т

Телеизмерение интегральных значений (ТИИ) 353
— по вызову (ВТИ) 353
— текущих значений (ТИТ) 353
Телеизмерений классификация 350
— погрешности 353
— устройства время-импульсные 376
— — интенсивности балансные 369
— — — небалансные 37
— — кодоимпульсные 380
— — цифровые 380, 409
— — частотные 375
Телеизмерения 344
Телеконтроль 447
Телеметрия (см. Телеизмерения)
Телемеханизация 524
Телемеханики история 14
— определение 6
— применение 24
— проблемы 27
— системы частотные 427
— — цифровые 434
Телерегулирование 432
Телеуправление 400
Теорема Котельникова 25
Теории информации применение 57
Трансформация сигналов 159

У

Уплотнение линии связи 128

Управление дистанционное 10
— местное 10
— телемеханическое 10
— циркулярное 405
Управления иерархичность 211
Устройство согласования с ЭВМ 472

Ф

Функции логические 232
Функциональные узлы 268, 308, 478
Характеристики систем 264

Ц

Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) 323
Цифровые устройства 308

Ч

Частота опроса каналов 405
Частотомер 378

Ш

Шаг квантования 27
Шифратор кода 285
Шумы 71

Э

Экономические критерии 532
Экстраполяция 54
Элементная база 261
Элементы выходные (исполнительные) 478
— логические (см. Логические элементы)
— унифицированные 476
Энтропия 65
Эффективность контроля 449
— — передачи информации 176

Предисловие 3
Введение 5

В.1. Основные понятия и классификация систем телемеханики 6
В.2. Краткий обзор развития телемеханики в СССР . . . 14

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Глава первая. Сообщения и сигналы 20

1.1. Особенности сообщений ТУ, ТС, ТИ 20
1.2. Преобразование непрерывных сообщений в дискретные сигналы 24
1.3. Преобразования сигналов 30
1.4. Спектры сигналов 34
1.5. Многоканальные методы 47

Глава вторая. Применение теории информации . . . 57

2.1. Информация и ее характеристики 57
2.2. Передача информации без помех 66
2.3. Передача информации при помехах 71

Глава третья. Коды и кодирование 77

3.1. Основные понятия 77
3.2. Цифровые коды 85
3.3. Нецифровые коды 93
3.4. Коды с обнаружением и исправлением ошибок . . . 97
3.5. Способы передачи кодированных сигналов 126

Глава четвертая. Каналы связи 128

4.1. Основные понятия 128
4.2. Проводные линии 131
4.3. Радио-, радиорелейные и космические каналы . . . 139
4.4. Световодные линии связи 140
4.5. Помехи в каналах связи 142
4.6. Борьба с индустриальными помехами 149

Глава пятая. Помехоустойчивость и эффективность передачи 152

5.1. Помехоустойчивость при дискретных сигналах . . . 152
5.2. Помехоустойчивость при передаче непрерывных сигналов 169
5.3. Эффективность передачи 176

Глава шестая. Оптимизация структуры сетей (обзор) . 183

6.1. Основные определения 183

6.2. Краткий обзор структур 187
6.3. Аналитические методы оптимизации при недогруженных линиях связи 197
6.4. Алгоритмические методы оптимизации при недогруженных линиях связи 201
6.5. Оптимизация при интенсивно нагруженных линиях связи . 206
6.6. Оптимизации иерархических структур 211

Глава седьмая. Схемы дискретного действия 221

7.1. Основы алгебры логики 221
7.2. Логические элементы 224
7.3. Триггеры 227
7.4. Комбинационные (однотактные) схемы 231
7.5. Последовательностные (многотактные) схемы . . . 237
Вопросы для самопроверки по первой части книги . . . 242

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ

Глава восьмая. Информационные системы и их характеристики 246

8.1. Информационные процессы и системы 246
8.2. Общие черты развития систем 256
8.3. Элементная база систем 261
8.4. Важнейшие характеристики систем 264

Глава девятая. Функциональные узлы общего назначения 268

9.1. Распределители импульсов и измерительные коммутаторы 268
9.2. Кодирующие и декодирующие узлы 284
9.3. Преобразователи кодов 289
9.4. Модуляторы, демодуляторы, модемы 295

Глава десятая. Функциональные узлы цифровых устройств телемеханики 308

10.1. Счетчики импульсов и пересчетные схемы 308
10.2. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) . . . 311
10.3. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) . . . 323

Глава одиннадцатая. Отображение информации . . 329

11.1. Рекомендации инженерной психологии 329
11.2. Отображение элементов информации 334
11.3. Отображение информации на моделях 338

Глава двенадцатая. Принципы телеизмерения . . . 341

12.1. Основные понятия об измерениях и телеизмерениях . . 341
12.2. Многоканальные телеизмерения 351
12.3. Погрешности измерений 353
12.4. Статистические измерения и телеизмерения . . . 360

Глава тринадцатая. Устройства телеизмерения 367

13.1. Аналоговые устройства 367
13.2. Кодо-импульсные устройства 380

13.3. Многоканальные кодо-импульсные устройства . . . 388
13.4. Сравнительная оценка аналоговых и цифровых ТИ . 399

Глава четырнадцатая. Принципы телеуправления и телесигнализации . . . 400

14.1. Основные понятия . . . 400
14.2. Частотное и временное разделение сигналов . . . 410
14.3. Кодовое разделение сигналов . . . 413

Глава пятнадцатая. Устройства телеуправления и телесигнализации . . . 420

15.1. Многопроводные устройства . . . 420
15.2. Частотные устройства . . . 426
15.3. Устройства с временным разделением сигналов . . 431
15.4. Комплекс устройств телемеханики ТМ-320 . . . 434
15.5. Краткий обзор зарубежных систем . . . 442

Глава шестнадцатая. Телеконтроль и техническая диагностика . . . 447

16.1. Основные понятия . . . 447
16.2. Эффективность автоконтроля и телеконтроля . . . 449
16.3 Автоматический поиск неисправностей (техническая диагностика) . . . 453
16.4. Распознавание в автоконтроле . . . 457

Глава семнадцатая. Передача данных . . . 461

17.1. Общая характеристика . . . 461
17.2. Аппаратура передачи данных . . . 464
17.3. Системы обслуживания с ЭВМ . . . 468
17.4. Устройства сопряжения с ЭВМ . . . 472

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ВНЕДРЕНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Глава восемнадцатая. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации ГСП . . 474

18.1. Принципы построения ГСП . . . 474
18.2 Агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники . . . 475
18.3 Агрегатная система средств телемеханики . . . 476
18.4. Интерфейс . . . 479
18.5. Информационные потоки и приоритеты . . . 487
18.6. Применение микро-ЭВМ и микропроцессоров в телемеханике . . . 493

Глава девятнадцатая. Информационные сети с ЭВМ . . 505

19.1. Вводные замечания . . . 505
19.2. Функции сетей . . . 508
19.3. Примеры сетей . . . 511
19.4. Передача данных в сетях . . . 516
19.5. Сети телемеханики . . . 518

Глава двадцатая. Принципы проектирования . . . 524

20.1. Развитие телемеханизации 524
20.2. О выборе общих принципов построения систем . . 527
20.3. Критерии оценки 532
20.4. Особенности проектирования 536
20.5. Этапы проектирования 539
Приложение 1 544
Приложение 2 547
Приложение 3 548
Список литературы 549
Алфавитный указатель 552

Виктор Александрович Ильин

ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ И ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ

Редактор издательства А. Н. Гусяцкая
Художественный редактор В. А. Гозак-Хозак
Технический редактор Г. Г. Самсонова
Корректор Г. А. Полонская

ИБ № 3242

Сдано в набор 31. 03. 82. Подписано в печать 29. 06. 82. Т-13383 Формат $84 \times 108^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная Печать высокая. Усл. печ. л. 29,4 Усл кр.-отт. 29,4. Уч.-изд. л. 31,79. Тираж 30 000 экз. Заказ № 82. Цена 1 р 30 к.

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114 Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д 7.